

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**РУДАКОВ Леонід Миколайович**

УДК 504.064:550.837



**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ  
ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД  
ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

Спеціальність 21.06.01 – Екологічна безпека

**Реферат**  
дисертації на здобуття наукового  
ступеня доктора технічних наук

Дніпро – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі водогосподарської інженерії Дніпровського державного аграрно-економічного університету Міністерства освіти і науки України (м.Дніпро).

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро)

**КОВРОВ**  
**Олександр**  
**Станіславович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, хімії та хімічної технології Національного університету «Київський авіаційний інститут» (м. Київ)

**ДУДАР**  
**Тамара**  
**Вікторівна**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ)

**ВОЛОШКІНА**  
**Олена**  
**Семенівна**

Захист відбудеться «26» червня 2026 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02 із захисту дисертацій при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19).

Реферат розіслано «25» травня 2026 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук,  
професор



**Тетяна ЯКОВИШИНА**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Накопичення у світі понад 223 млрд тон відходів у близько 35 000 хвостосховищах є критичним викликом глобального масштабу, що зумовлює гостру необхідність забезпечення екологічної безпеки гідротехнічних споруд (ГТС). Глобальні прогнози вказують на зростання обсягів зріджених відходів, а це в свою чергу, на тлі фізичного старіння об'єктів підвищує ризик катастрофічних відмов дамб. Статистика підтверджує вразливість наливних конструкцій (51,2% аварій), а трагедії останніх років у Бразилії та Танзанії доводять, що сучасні ГТС часто експлуатуються поза межами проєктних ресурсів.

Україна посідає одне з провідних місць за обсягами промислових відходів у Європі: у 465 хвостосховищах зосереджено понад 6 млрд тон небезпечних речовин. Найвище техногенне навантаження зафіксовано у Дніпропетровській області (318,3 тис. т на 1 км<sup>2</sup>), де зосереджені найбільші об'єкти гірничо-металургійного комплексу. Реальність загрози для регіону підтверджується аваріями на місцевих об'єктах, зокрема витоком 80 000 м<sup>3</sup> води на хвостосховищі «Центральне». Ключовою науковою проблемою залишається розробка своєчасної та достовірної методики та методології оцінки технічного стану ГТС, прогнозування та моделювання втрати стійкості дамб через багаторічну експлуатацію, неминуче старіння конструкцій та систематичне перевищення проєктних потужностей. Підсилює техногенну небезпеку цих об'єктів зміна клімату, що супроводжується зростанням інтенсивності атмосферних опадів та паводками зливового характеру, спричиняє надмірне водонасичення тіла дамб і ложа накопичувачів, інтенсифікує фільтраційні процеси, активізує міграцію забруднювачів та суттєво знижує коефіцієнт стійкості споруд. Додаткову загрозу становить розташування об'єктів у зоні збройного конфлікту, що через артилерійські обстріли, атаки БПЛА та мінування територій може призвести до прямого руйнування ГТС та розвитку гідродинамічних надзвичайних ситуацій.

Разом з гідротехнічними об'єктами промислового сектору значну роль у забезпеченні водної безпеки територій та держави в цілому відіграють цивільні ГТС, в тому числі сільськогосподарського призначення. Виконуючи акумулюючу та розподільчу функції вони є надійними, а інколи і єдиними постачальниками води як для промисловості, так й для населення. Критичний фізичний знос іригаційних систем (Кільченської, Вищитарасівської, Солоняно-Томаківської та ін.) призводить до значних втрат водних ресурсів, вторинного засолення земель, підтоплення угідь та загрожує продовольчій безпеці. Отже, водна безпека держави має враховувати сумісний внесок як промислових, так і цивільних ГТС, причому, залежно від промислової спеціалізації кожного регіону України частка цього внеску може змінюватися в той чи інший бік. Невирішена частина загальної проблеми полягає у відсутності науково обґрунтованої методології управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд в умовах їхнього критичного зносу. Подолання критичного розриву між стрімким погіршенням технічного стану ГТС будь-якого призначення та методами його оцінки становить значну науково-практичну проблему, вирішення якої дозволить прийняти оперативні рішення для зменшення усіх видів небезпек,

пов'язаних з водним середовищем.

Таким чином, в дисертації вирішується актуальна науково-технічна проблема, що полягає у створенні сучасної методології оцінки технічного стану та управління екологічною безпекою сумісного функціонування промислових і цивільних гідротехнічних споруд в умовах критичного зносу й підвищеного техногенного навантаження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі водогосподарської інженерії Дніпровського державного аграрно-економічного університету в межах науково-дослідних робіт: № 2929-п «Науково-практичні засади підвищення безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд» (2022–2025 рр., № держреєстрації 0122U201615, керівник теми), № 2113-п «Інноваційні пріоритети розвитку водокористування в басейнах річок Дніпропетровщини з урахуванням змін клімату і кризових ситуацій» (2025 р., № держреєстрації 0125U001424, відповідальний виконавець); № 2504-п «Розробка інформаційних технологій проектування та раціонального функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів» (2015–2019 рр., № держреєстрації 0114U005587, відповідальний виконавець); № 2733-п «Розробка геоінформаційних технологій проектування, моделювання та моніторингу водогосподарських об'єктів» (2020–2024 рр., № держреєстрації 0120U100321, відповідальний виконавець), №0122U201614 «Моніторинг небезпечних техногенних процесів у Дніпропетровській області» (відповідальний виконавець); № 0114U006324 «Розробка методики визначення технічного стану ґрунтових гідротехнічних споруд геофізичними методами»; № 0110U001969 «Формування екологічно безпечного навколишнього середовища та безпеки життєдіяльності в Придніпровському регіоні» (відповідальний виконавець); а також госпдоговірних робіт: «Проект заходів по поліпшенню технічного стану греблі Сухачівського хвостосховища радіоактивних відходів в м. Кам'янське Дніпропетровської області», (2012 р., відповідальний виконавець), «Звіт про результати обстеження технічного стану верхньої дамби хвостосховища «Сухачівське» (1 секція) за даними геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі», (2012р., відповідальний виконавець), «Визначення геофізичними методами зон фільтрації та розрахунок обсягів втрат води з магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи», (2018р., відповідальний виконавець), «Про результати обстеження технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» за даними геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі Дніпро», (2016р., відповідальний виконавець), «Оцінка гідрогеомеханічної стійкості низового укусу огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське», (2022 р., відповідальний виконавець).

Дисертаційна робота відповідає зобов'язанням України в межах Паризької угоди щодо мінімізації небезпеки стихійних лих та транскордонного забруднення водних ресурсів і засадам Стратегії екологічної безпеки та може бути залучена до плану повоєнної відбудови України. Дослідження є логічним продовженням і реалізацією цілей Стратегії сталого розвитку «Україна – 2030».

**Мета роботи** – розробка та обґрунтування науково-технічних засад

управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового комплексу шляхом удосконалення методів інструментального контролю для діагностики зон фільтрації та оцінки гідрогеомеханічної стійкості огорожувальних дамб для запобігання техногенним катастрофам і мінімізації їх негативного впливу на довкілля.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати причини еколого-техногенних небезпек та наслідків аварій на ГТС гірничопромислового призначення, виявити домінуючі фактори, які призвели до появи, розвитку надзвичайних та аварійних ситуацій.

2. Оцінити вплив природних кліматичних і геологічних факторів на техногенну безпеку ГТС.

3. Обґрунтувати можливості застосування неруйнівних геофізичних методів (ШЕМПЗ, ВЕЗ, радіометрія) як елементу інформаційної основи для комплексного еколого-технічного аналізу з метою оцінки технічного стану ГТС.

4. Обґрунтувати доцільність застосування комплексної методики оцінки технічного стану ГТС, яка містить прогнозу складову (тектонічний аналіз тріщинуватості району розташування) та розрахункову складову (математичні моделі прогнозування напружено-деформованого стану у тілі ГТС).

5. На підставі запропонованої методики виконати оцінку геомеханічної стійкості дамб хвостосховищ «Дніпровське» і «Сухачівське», розрахувати індекси ризику і небезпеки, розроблені за методикою UBA (Німеччина) та дослідити екологічну небезпеку забруднення території в області міграції радіонуклідів з хвостосховища «Дніпровського» до р. Коноплянка.

6. Оцінити ефективність технічних рішень щодо підвищення надійності та екологічної безпеки ГТС, спрямованих на реалізацію стратегії сталого розвитку та дотримання нормативів екологічної безпеки держави.

7. Обґрунтувати концепцію управління екологічною безпекою ГТС гірничопромислового комплексу з врахуванням ролі і значення ГТС цивільного та сільськогосподарського призначення.

*Ідея дослідження* полягає у створенні комплексної системи превентивного еколого-технічного оцінювання гідротехнічних споруд, що базується на інтеграції методів неруйнівного інструментального контролю та моделювання єдиної гідродинамічної мережі регіону. Це дозволяє не лише своєчасно виявляти критичні зони деформації промислових дамб, а й використовувати ресурсний потенціал цивільних систем як стратегічних бар'єрів для оперативного перехоплення токсичних витоків, забезпечуючи екологічну стійкість промислових регіонів у кризові періоди.

*Об'єкт дослідження* – процеси управління екологічною безпекою водогосподарського комплексу в гірничопромислових регіонах.

*Предмет дослідження* – науково-технічні засади екологічно безпечної експлуатації ГТС гірничопромислового та цивільного призначення.

*Методи дослідження.* Для досягнення поставленої мети та розв'язання завдань використано комплексний науковий-практичний підхід, що базується на поєднанні теоретичних, експериментально-лабораторних і розрахункових методів та польових досліджень.

Теоретичні та загальнонаукові методи: системний аналіз, наукове

узагальнення та порівняльно-географічний метод – для вивчення світових трендів екологічної безпеки ГТС, класифікації чинників техногенної небезпеки та систематизації причин аварій на хвостосховищах.

Польові дослідження методами неруйнівної інструментальної зйомки: комплекс геофізичних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) для дослідження цілісності ґрунтових дамб, виявлення прихованих зон фільтрації та тектонічних порушень; вертикального електричного зондування (ВЕЗ) для визначення параметрів залягання ґрунтових вод; радіометричні дослідження для оцінки радіаційного стану та контролю міграції небезпечних речовин у зонах впливу хвостосховищ.

Методи математичного та комп'ютерного моделювання: аналіз напружено-деформованого стану ґрунтових масивів та оцінка їх гідрогеомеханічної стійкості (у програмному комплексі Phase 2); моделювання фільтраційних процесів та міграції забруднювачів.

Методи еколого-технічного оцінювання: комплексна діагностика фактичного стану безпеки об'єктів промислового призначення; розрахунково-аналітичні методи для визначення індексів ризиків та небезпек – Tailings Hazard Index (THI) і Tailings Risk Index (TRI) за методикою Агентства Німеччини з навколишнього середовища (UBA) та потенційного впливу ГТС на екосистеми регіону.

Графоаналітичні та картографічні методи використані для візуалізації результатів досліджень ПЕМПЗ, побудови моделей поверхонь та картографічного представлення ореолів забруднення й зон фільтрації.

Методи техніко-економічного обґрунтування для розробки та оцінки ефективності інженерних рішень, спрямованих на підвищення надійності ГТС та забезпечення дотримання нормативів екологічної безпеки.

#### **Наукові положення, що виносяться на захист:**

1. Одним з чинників підвищення рівня техногенної небезпеки хвостосховищ є сучасна зміна клімату (зростання температури на 2,0–2,3°C та зниження гідротермічного коефіцієнта прибутку на 0,037–0,042), що призводить до пересихання ґрунтового покриву дамб із подальшим тріщиноутворенням і під час інтенсивних злив зумовлює неконтрольоване перезволоження матеріалів, активізацію фільтрації та ерозійних процесів (зокрема суфозії). Це обумовлює щорічне розширення параметрів зон замочування дамб на 10-15%, яке підтверджено польовими спостереженнями та математичним моделюванням.

2. Тектонічна будова району розташування визначає в дамбах ГТС ступінь розвитку тріщин, максимальна кількість яких приурочена до основних глибинних розломів Українського щита ортогональної системи і пригніченої системи північно-західних напрямків з азимутами простягання 300°–330°, за якими відбуваються сучасні рухи, що може розглядатися як тектонічний фактор підготовки дамб ГТС до прояви небезпечних процесів. Техногенні вібрації (вибухи, рух транспорту тощо) підсилюють роль тектонічного фактору та пришвидшують фільтраційно-деформаційні процеси.

3. Рівень екологічної безпеки рівнинних хвостосховищ визначається впливом обводнення на геомеханічну стійкість огорожувальних дамб, яке підтверджується чисельним моделюванням і проявляється зниженням фізико-механічної міцності порід зі збільшенням водонасичення, а також буферними

властивостями дамб, водоносних горизонтів і донних відкладів у прилеглих невеликих водотоках, які уповільнюють міграцію небезпечних сполук до поверхневих водних об'єктів на один-два порядки внаслідок сорбційних властивостей порід.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. *Вперше встановлено*, що сучасна зміна клімату, пов'язана зі зростанням температури призводять до посиленої евапотранспірації та інтенсивного тріщиноутворення на дамбах з ґрунтових матеріалів, що під час інтенсивних злив зумовлює неконтрольоване перезволоження матеріалів, активізацію фільтрації та ерозійних процесів (зокрема суфозії).

2. *Вперше встановлено* тісний генетичний зв'язок між орієнтуванням тріщин в дамбах ГТС та геолого-тектонічною будовою території: азимути простягання тріщин збігаються з напрямками ортогональної та північно-західної систем розломів, що дозволяє прогнозувати потенційний розвиток тріщинуватості на будь-яких дамбах території Українського щита.

3. *Вперше встановлено*, що на підставі моделювання водної міграції радіонуклідів з хвостосховища «Дніпровське» їхня концентрація на вихідній межі ґрунтового горизонту наразі не досягла свого максимального значення, зафіксованого у водному розчині відвалів, при цьому на тлі найбільшого зростання вмісту урану в ґрунтових водах концентрації радію і торію залишаються практично незмінними, а фронт міграції ще не досяг берегової лінії р. Коноплянки.

4. *Вперше встановлено* закономірності техногенно-екологічної взаємодії комплексів гірничопромислових (хвостосховища) та цивільних (водопідвідні канали) гідротехнічних споруд, що полягають у виникненні кумулятивного ефекту підтоплення та фільтраційного забруднення територій, яке суттєво знижує загальний рівень екологічної безпеки регіону та потребує єдиного підходу до моніторингу їхнього стану.

5. *Вперше сформульовано* засади наукової концепції, які інтегрують ГТС гірничопромислового призначення та об'єкти цивільної меліоративної мережі в єдину гідродинамічну систему для управління екологічною безпекою промислового регіону.

### **Удосконалено:**

– комплексну методику інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС, яка поєднує результати геофізичних досліджень технічного стану огорожувальних споруд та прогнозного математичного моделювання небезпечних процесів (міграції забруднювачів та втрати стійкості огорожувальних дамб), що дозволяє ідентифікувати критичні стани споруд на ранніх стадіях;

– методичний підхід до оцінки гідрогеомеханічної стійкості ґрунтових дамб хвостосховищ і цивільних ГТС шляхом інтеграції даних натурних геофізичних обстежень у моделі напружено-деформованого стану та фільтрації, що дозволяє більш вірогідно прогнозувати аварійні ситуації;

– методичний підхід до оцінки екологічної небезпеки дамб ГТС шляхом додавання індексів ТНІ (Tailings Hazard Index) і ТРІ (Tailings Risk Index);

– обґрунтування вибору та параметрів інженерних рішень (зокрема,

протифільтраційних) для підвищення екологічної безпеки експлуатації ГТС на основі порівняльного аналізу та оцінки їхньої економічної ефективності, що має важливе практичне значення для прийняття управлінських рішень.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у безпосередньому застосуванні розроблених науково-технічних засад, методик та інженерних рішень для управління екологічною безпекою експлуатації гідротехнічних споруд в гірничопромислових регіонах.

Розроблена комплексна методика інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС може бути використана органами державного нагляду та організаціями, що здійснюють експлуатацію для проведення аудиту безпеки та регламентування моніторингу хвостосховищ.

Для діагностики та прогнозування запропонований комплекс геофізичних методів (ПЕМПЗ, ВЕЗ) та алгоритми їхньої обробки, які можуть бути впроваджені в практику технічної діагностики для оперативного виявлення дефектів та прихованих фільтраційних зон у тілі дамб, що підвищує їхню експлуатаційну надійність та рівні екологічно безпечної експлуатації.

Встановлений тектонічний фактор дає змогу спрогнозувати на діючих та недіючих ГТС генеральні напрямки розвитку тріщин та розущільнення матеріалів, які можуть виступати в якості потенційних зон фільтрації, замочування, розвитку небезпечних геологічних процесів, а для ГТС, що проєктуються – врахувати ці закономірності.

Математичні моделі, індекси ТНІ і TRI, розроблені для прогнозування міграції забруднювачів та стійкості, дозволяють обґрунтовано обирати пріоритетні об'єкти для проведення ремонтних робіт та протиаварійних заходів.

Інженерно-технічні рішення та рекомендації, обґрунтовані в дисертації для підвищення стійкості дамб та зменшення фільтрації (зокрема, для хвостосховищ «Дніпровське», «Сухачівське»), можуть бути використані при проєктуванні, реконструкції та експлуатації ГТС.

Порівняльний аналіз економічної ефективності протифільтраційних заходів слугує інструментом для прийняття інвестиційних рішень щодо впровадження найкращих доступних технологій для захисту навколишнього середовища.

**Реалізація результатів роботи.** Результати досліджень були апробовані на державному підприємстві «Бар'єр», що обслуговує хвостосховища радіоактивних відходів і в Регіональному офісі водних ресурсів у Дніпропетровській області, а також впроваджені у навчальний процес підготовки фахівців за спеціальністю G2 «Технології захисту навколишнього середовища» у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні проблеми, мети, ідеї, завдань досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій щодо їх практичної реалізації, у теоретичному обґрунтуванні, розробці та апробації науково-технічних засад забезпечення екологічної безпеки гідротехнічних споруд, що відображено у наступному:

Проведено системний аналіз та узагальнення даних щодо екологічної безпеки ГТС, систематизовано причини найбільших аварій на хвостосховищах, що стало основою для визначення критичних факторів небезпеки.

Розроблено та обґрунтовано комплексну методику інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС, яка поєднує геофізичну діагностику та математичне прогнозування небезпечних процесів.

Виконано польові геофізичні дослідження (методи ПЕМПЗ, ВЕЗ) та радіометричні вимірювання на обраних хвостосховищах і цивільних ГТС, проведено інтерпретацію геофізичних даних та еколого-технічну діагностику їхнього стану безпеки.

Розроблено та реалізовано математичні моделі напружено-деформованого стану та фільтрації для прогнозування стійкості дамб і міграції радіонуклідів.

Вперше сформульовано науково-технічні засади екологічної безпеки експлуатації ГТС, які є основою для розробки інженерних рішень з мінімізації ризиків, та обґрунтовано індекси безпеки для ключових об'єктів.

Запропоновано та економічно обґрунтовано комплекс інженерних рішень та протифільтраційних заходів для забезпечення надійності та безпеки досліджених ГТС промислового призначення.

Результати дисертаційної роботи представлені в одноосібних працях [13 – 17, 33, 35] чи у співавторстві [1 – 12, 18 – 32, 34, 36 – 40], де здобувач брав участь у визначенні напрямків та задач дослідження, виконанні експериментальних досліджень і розрахунків, аналізі та обговоренні результатів, оформленні матеріалів для наукових статей.

Робота є результатом самостійних досліджень Рудакова Л.М.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові теоретичні положення та результати отриманих експериментальних даних за напрямком дисертаційної роботи були представлені та отримали позитивну оцінку після обговорення на наступних конференціях: Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» – 2023 (міжнар. конф.), 11-13 жовтня 2023 р., м. Дніпро; I Міжнародна конференція «Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку», 23 жовтня 2025 р., м. Київ; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348(1); V Industrial, Mechanical And Electrical Engineering. Air publishing; 3 Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Impact of Artificial Intelligence and Other Technologies on Sustainable Development», 11-12 грудня 2025 р.; Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Development of Education, Science and Business: Results 2025», 18-19 грудня 2025 р.; 2 Міжнародна науково-практична конференція «Science, Technology and Industry in the Digital Age» Гамбург, Німеччина: 17-19 грудня 2025 р.; «Настоящи изследвания и развитие» – 2014 (X міжнародна научна практична конференція), 17-25 січня 2014 р., Софія, Болгарія; Управління водними ресурсами в умовах зміни клімату (Всеукр. наук.-практ. конф.), 21 березня 2017 р., м. Київ; Екологічний стан водних ресурсів України та перспективи забезпечення населення питною водою (I Міжнародна наук.-практ. конф.), 6 – 7 липня 2018 р., м. Дніпро; 2nd International multidisciplinary conference Sustainable Development Trends and Challenges under COVID-19, 29-30 листопада 2021 р., м. Суми, Україна; XI Міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні», 2023 р., м. Київ.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 40 наукових праць, в тому числі: 2 монографії, 18 статей у наукових фахових виданнях, з яких 7 статей у виданнях, індексованих у наукометричній базі Scopus і WoS (2 статті – Q2, 2 статті – Q3, 2 статті – Q4 (матеріали міжн. конф.), 1 стаття – WoS), 10 патентів на корисну модель, 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (285 найменувань на 35 сторінках) і 5 додатків (на 42 сторінках), 122 рисунків, 34 таблиць. Обсяг основного тексту становить 247 сторінок, з них площу 24 сторінок повністю займають рисунки та таблиці. Загальний обсяг роботи складає 359 сторінок.

**Подяка.** Висловлюю глибоку вдячність професору, д.г.н. Орлінській О. В. за фахову допомогу, цінні поради та системну підтримку на всіх етапах підготовки докторської дисертації.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** висвітлено стан екологічної безпеки експлуатації гідротехнічних споруд промислового призначення та шляхи їх підвищення, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет досліджень. Показано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, вказано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію роботи і структуру дисертації.

**Перший розділ** присвячено аналізу складових техногенної безпеки експлуатації гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення.

У світі налічується десятки тисяч існуючих, недіючих та занедбаних хвостосховищ, які містять мільярди тон відходів. Щорічно у світі утворюється близько 8 млрд тон хвостів, при цьому середній обсяг одного хвостосховища становить 17 млн м<sup>3</sup>.

З 1960 р. до 2025 р. зареєстровано всього 362 серйозних інциденти, з них із ідентифікованих причин – 286, і прогнозується, що через старіння об'єктів, збільшення обсягів хвостів ризик катастрофічних відмов збільшуватиметься. Основні фактори, що впливають на зростання екобезпеки, включають: вихід більшості сховищ за рамки початкового проекту, старість та відсутність незалежного аналізу стійкості старих об'єктів, а також збільшення обводнення дамб. Більшість з усіх зареєстрованих аварій припадає на наливні дамби, які споруджуються вгору за течією, що вказує на їх підвищену небезпеку. Найчастішими причинами аварій є порушення стійкості схилу дамби, сейсмічні прояви та переповнення проектної ємності (рис. 1). Катастрофи, такі як Бенто Родрігес (2015) і Брумадіню (2019) у Бразилії, демонструють, що прориви дамб через зливи та переповнення призводять до витoku мільйонів кубометрів токсичних відходів та масштабного забруднення річок.

Україна посідає провідне місце в Європі за обсягами накопичення відходів, понад 85% яких генерує гірничовидобувна промисловість. Станом на початок 2021 року загальний обсяг накопичених відходів перевищив 15,6 млрд тонн, причому критичне техногенне навантаження зосереджено у Дніпропетровській (зокрема Криворізький залізорудний басейн) та Донецькій областях.

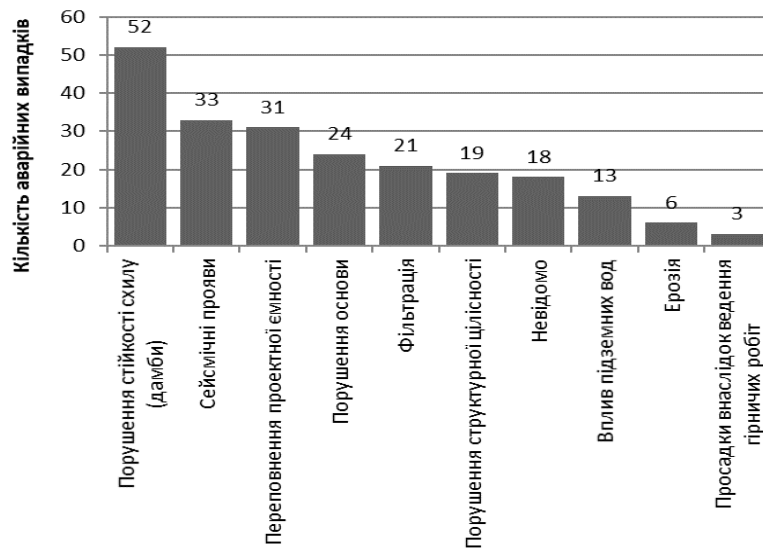


Рисунок 1 – Розподіл кількості аварій та їх причини (ICOLD, 2021)

На території країни експлуатується 465 хвостосховищ, значна частина яких була споруджена за радянських часів. Технічний стан цих об'єктів викликає занепокоєння і створює постійну загрозу масштабних екологічних катастроф.

Історичні приклади, як-от прорив дамби у Києві (Курінівська трагедія), Стебнику (1983), чи інтенсивне пиління на Миколаївському глиноземному заводі (2021) та аварія на калійному заводі в Калуші (2008), підтверджують екологічну небезпеку подібних об'єктів. Особливої гостроти ця проблема набуває для Криворізького залізрудного басейну, де концентрація техногенних об'єктів є найвищою в Україні. Прикладом сучасних ризиків стала надзвичайна ситуація на хвостосховищі «Центральне» ПрАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» (грудень 2021 р.).

Усі наведені факти свідчать про необхідність контролю і моніторингу стану, як діючих, так і неактивних хвостосховищ та шламосховищ. Законодавство України (Закон «Про охорону навколишнього природного середовища») передбачає створення державної системи моніторингу довкілля, а будівельні норми (ДБН В.2.4-5:2012 «Хвостосховища і шламонакопичувачі...») встановлюють вимоги до проєктування та будівництва нових, реконструкції, консервації та рекультивації чинних хвостосховищ. Контроль повинен включати візуальні спостереження (стан укосів, дренажів, водоскидних споруд) та інструментальні дослідження.

Для діагностики стану гідротехнічних споруд (ГТС) згідно з нормативними документами України рекомендовано застосування неруйнівних геодезичних і геофізичних методів. Комплекс геофізичних методів, як-от електророзвідка, сейсмоакустичне профілювання та георадіолокація, дозволяє виявляти приховані зони обводнення і деформації, порожнечі та ділянки підвищеної фільтрації. Попри наявність законодавчої бази, можливості щодо забезпечення техногенної безпеки хвостосховищ на об'єктах часто залишаються не використаними.

Проведений аналіз аварій на хвостосховищах світу засвідчив, що серед основних факторів, недостатньо або взагалі відсутнє належне врахування впливу глобальної зміни клімату, сучасних тектонічних та регіональних геодинамічних

чинників. Ця недооцінка створює значну прогалину у забезпеченні довгострокової екологічної безпеки об'єктів.

Зміна клімату пов'язана із збільшенням інтенсивності короткочасних злив та повторюваністю екстремальних паводків спричиняє критичне водонасичення ґрунтових масивів і гідродинамічне перевантаження конструкцій, що перевищує їхні початкові розрахункові параметри та підвищує ризик руйнування огорожувальних дамб.

Суттєве зростання середньорічної температури (на 2,0–2,3 °С у Дніпровському регіоні) та збільшення кількості спекотних днів призводять до висушування ґрунтів і тріщиноутворення в тілі дамб, а різкі температурні коливання прискорюють фізичне старіння бетону й знижують загальну міцність конструкційних елементів ГТС.

Зміна структури опадів у теплий період активізує процеси площинної та лінійної ерозії поверхні ГТС, а інтенсивна інфлюація води через деформаційні тріщини стимулює розвиток суфозійних явищ та порушує стійкість дамб і основ споруд, що потребує негайної адаптації методів діагностики до нових кліматичних сценаріїв.

Тектонічний чинник є фундаментальним природним ризиком, який стає критичним особливо для старих об'єктів. Попри включення сейсмічності до причин аварій, чинні розрахунки часто базуються на неактуальних даних і не враховують геодинаміку регіону. Сучасні неотектонічні рухи можуть призводити до повільних, але постійних деформацій основи ГТС (особливо протяжних об'єктів, як-от довгі дамби хвостосховищ або магістральних каналів), викликаючи зміщення, розриви та порушення цілісності протифільтраційних елементів. Тріщинуватість в основі споруди створює пріоритетні шляхи для фільтрації, що може значно підвищити швидкість міграції небезпечних розчинів (включаючи радіонукліди) та прискорити процеси ерозії.

У контексті військової агресії виникає додатковий, екстремальний чинник безпеки, який критично впливає на стійкість та безпеку ГТС. Удари по дамбах, водоскидних спорудах чи захисних об'єктах спричиняють миттєву втрату цілісності, що може призвести до катастрофічних повеней та неконтрольованого витоку токсичних або радіоактивних відходів із хвостосховищ. Бойові дії унеможливають проведення регулярного візуального та інструментального моніторингу, планового технічного обслуговування та необхідних ремонтних робіт. Це призводить до ускладнення своєчасного виявлення аварійних ситуацій. Вибухи та значні сейсмічні напруги, спричинені застосуванням важкого озброєння, можуть викликати додаткові напружено-деформовані стани у тілі дамб та їхній основі, знижуючи загальну стійкість.

Промислові хвостосховища та цивільні магістральні канали становлять єдину геотехнічну систему, оскільки мають спільні принципи проектування на основі ґрунтових огорожувальних конструкцій, схожі технології будівництва шляхом наміву або відсіпки та подібні умови експлуатації у відкритому природному середовищі. Спільність причин аварійності цих об'єктів, зумовлена порушенням фільтраційного режиму та втратою стійкості укосів, дозволяє впроваджувати уніфіковану типізацію досліджень із застосуванням неруйнівних геофізичних методів для діагностики стану всієї водогосподарської

інфраструктури. Розгляд цих споруд як невід'ємних складників єдиного комплексу є критично важливим для забезпечення стратегічного резервування водних ресурсів та мінімізації кумулятивного екологічного ризику в промислових регіонах. Такий системний підхід дозволяє масштабувати отримані наукові результати на інші типові об'єкти критичної інфраструктури, забезпечуючи перехід від локального дослідження до комплексної стратегії екологічної безпеки держави.

Вагомий внесок із дослідження екологічної безпеки гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення зробили як вітчизняні науковці, такі як: Бугай Д.О., Верховцев В. Г., Галецький Л.С., Джепо С.П., Дудар Т.В., Кисіль А. І., Кушинов М. В., Лисиченко Г. В., Махінько А.В., Ніколаєва І.О., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Д.В., Свіденюк М.О., Скальський О. С., Станкевич С. А., Стефанишин Д.В, Шматков Г.Г., Юськів Ю.В., так і закордонні – S. Azam, C. Roche, K. Thygesen, E.Baker, Islam K., Murakami S., Piciullo L., Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., Hudson-Edwards, K.A., Singh, S., Kumar, A., Sitharam, T.G., Hegde, A. та багато ін.

Гостра необхідність гарантування екологічної безпеки ГТС в умовах воєнних загроз, кліматичної нестабільності та критичного зносу інфраструктури обумовлює перехід від застарілих методів візуального нагляду до інноваційної системи комплексного інструментального дослідження.

В умовах руйнування дамб на стратегічних водосховищах, таких як Каховське та Карачунівське, магістральні канали трансформуються з суто іригаційних об'єктів у безальтернативні артерії водозабезпечення регіону. У критичних ситуаціях вони стають єдиним джерелом технічної води для підтримки функціонування гірничорудних підприємств та постачання питної води мешканцям прилеглих населених пунктів. Відтак, забезпечення належного технічного стану та герметичності магістральних каналів виходить за межі сільськогосподарських потреб, набуваючи статусу питання національної безпеки. Саме тому моніторинг цілісності дамб цих каналів та запобігання фільтраційним втратам потребує такої ж пильної ваги, як і безпека великих промислових хвостосховищ.

Практичне застосування отриманих результатів дозволить забезпечити стійкість водогосподарського комплексу Дніпровського регіону, створити науково-технічне підґрунтя для модернізації захисних споруд та сформувавши надійний резерв екологічної безпеки об'єктів критичної інфраструктури України.

**Другий розділ** дисертаційної роботи присвячений обґрунтуванню методів досліджень технічного стану ГТС, зокрема огорожувальних дамб, а також принципам математичного моделювання, які використовуються для комплексної оцінки їх безпеки. Технічний стан огорожувальних дамб ГТС є критично важливим і залежить від численних гідрогеологічних, геомеханічних та експлуатаційних факторів. Візуальні методи огляду часто виявляються недостатніми, оскільки не здатні відобразити дійсні процеси, що відбуваються всередині тіла дамби, такі як прихована фільтрація або суфозійні явища. Головними причинами аварій на ГТС є поступова втрата міцності та стійкості ґрунтів дамби, а також руйнівний вплив фільтраційних вод, що спричиняє

суфозію та зсуви масиву. Для запобігання цим аваріям та забрудненню територій критично важливими є інструментальні дослідження, які дозволяють своєчасно виявити зони прихованої фільтрації та обводнення.

Через високу вартість і трудомісткість традиційних лабораторних і польових методів, у сучасній інженерній практиці значної популярності набувають неруйнівні методи діагностики, зокрема геофізичні. Згідно з вимогами ДБН А.2.1-1-2014, геофізичні методи доцільно застосовувати для детального розчленування геологічного розрізу, гідрогеологічних вишукувань, вивчення карсту, суфозії, та тріщинуватості. Для комплексної оцінки стану ґрунтових дамб водогосподарського призначення рекомендовано використовувати комплекс електророзвідувальних методів. Серед них, найбільш економічно вигідними є комплекс методів вертикального електричного зондування (ВЕЗ) та природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) (рис.2).

Метод ПЕМПЗ базується на реєстрації електромагнітного випромінювання, що генерується внутрішніми джерелами, зокрема тектонічними напругами та електрохімічними процесами. Інтенсивність випромінювання ПЕМПЗ різко зменшується у ділянках значного обводнення, розуцільнення або тріщинуватості ґрунту, що робить його чутливим індикатором порушень. На першому, пошуковому етапі досліджень дамб, метод ПЕМПЗ використовується для виділення аномальних зон фільтрації та обводнення. Метод ВЕЗ, в свою чергу, є одним із найбільш поширених електророзвідувальних методів і традиційно застосовується для детального вивчення горизонтально-шаруватих середовищ і визначення рівня ґрунтових вод.

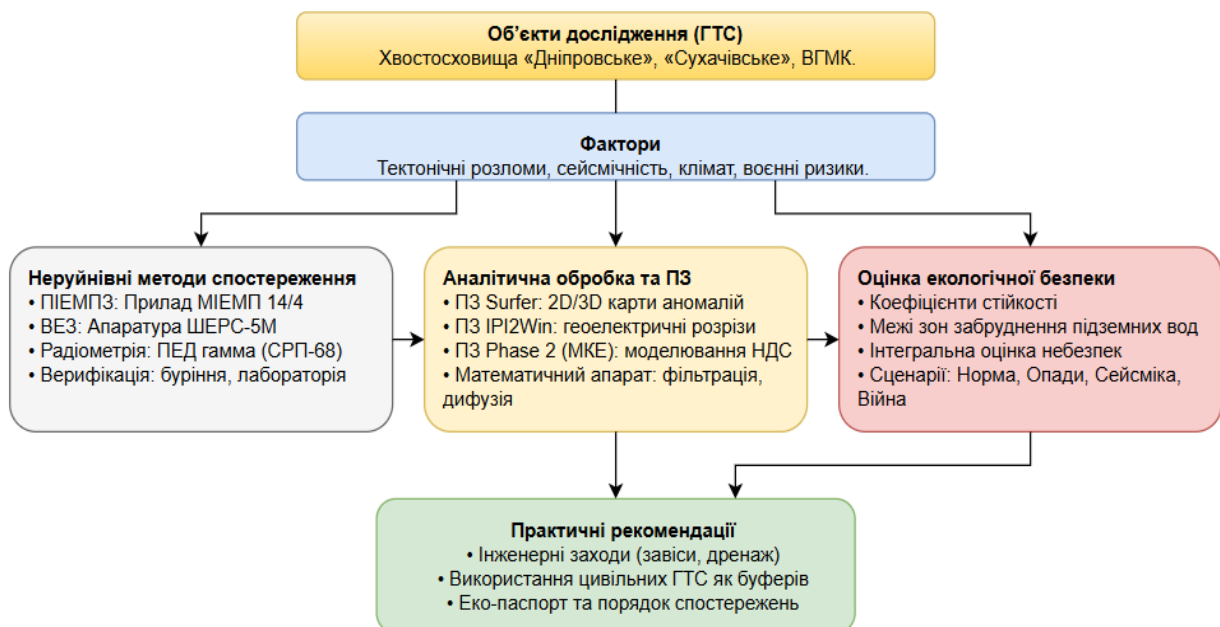


Рисунок 2 – Логіко-методологічна схема інтегрованої оцінки екологічної безпеки ГТС на основі поєднання методів неруйнівного контролю та математичного моделювання

Основні процеси, що визначають екологічну безпеку дамб, включають розвиток напружень, деформацій, фільтрацію та міграцію розчинних речовин. Для оцінки стійкості використовується пружно-пластична модель на базі методу

кінцевих елементів, що поєднує теорії пружності та граничного стану. Розрахунки, які вимагають значних обчислювальних ресурсів та комплексного моделювання, можуть бути реалізовані з використанням ліцензійного програмного забезпечення Phase2. Граничні умови пластичної течії визначаються критерієм Кулона-Мора, а загальна стійкість оцінюється методом зниження параметрів міцності для визначення коефіцієнта стійкості. Моделювання фільтрації ґрунтується на законі Дарсі та враховує вплив порового тиску через концепцію ефективних напружень. Математичне моделювання екологічної небезпеки базується на розв'язанні диференціальних рівнянь геофільтрації для напірно-безнапірних потоків, що дозволяє встановити поле швидкостей у тілі та основі ГТС.

Прогнозування поширення забруднювачів виконано на основі моделі конвективної дифузії з урахуванням лінійної оборотної сорбції та процесів деструкції речовин. Окрему увагу приділено моделюванню міграції радіонуклідів, де в рівняння масоперенесення інтегровано параметри радіоактивного розпаду та утворення дочірніх ізотопів. Використання чисельних (метод кінцевих елементів і метод скінчених різниць) та аналітичних методів розрахунку дозволило кількісно оцінити бар'єрну функцію споруд та сформулювати прогнозні сценарії екологічного навантаження на підземну гідросферу.

Таким чином, комплексний аналіз з використанням ліцензійних програм забезпечує обґрунтовану оцінку екологічної безпеки гідротехнічних споруд.

**Третій розділ** включає аналіз екологічної безпеки гідротехнічних споруд гірничопромислового і цивільного призначення.

Україна посідає одне з провідних місць за обсягами промислових відходів у Європі: у 465 хвостосховищах зосереджено понад 6 млрд тон небезпечних речовин. Найвище техногенне навантаження зафіксовано у Дніпропетровській області (318,3 тис. т на 1 км<sup>2</sup>), де зосереджені найбільші об'єкти гірничо-металургійного комплексу. Ключовою науковою проблемою залишається розробка своєчасної та достовірної методики та методології оцінки технічного стану ГТС, прогнозування та моделювання втрати стійкості дамб через багаторічну експлуатацію, неминуче старіння конструкцій та систематичне перевищення проектних потужностей.

Разом з гідротехнічними об'єктами промислового сектору значну роль у забезпеченні водної безпеки територій та держави в цілому відіграють цивільні ГТС, в тому числі сільськогосподарського призначення. Виконуючи акумулюючу та розподільчу функції вони є надійними, а інколи і єдиними постачальниками води як для промисловості, так й для населення. Критичний фізичний знос іригаційних систем (Кільченської, Вищетарасівської, Солоняно-Томаківської та ін.) призводить до значних втрат водних ресурсів, вторинного засолення земель, підтоплення угідь та загрожує продовольчій безпеці. Отже, водна безпека держави має враховувати сумісний внесок як промислових, так і цивільних ГТС, причому, в залежності від промислової спеціалізації кожного регіону України частка цього внеску може змінюватися в той чи інший бік.

Кам'янське є техногенно-напруженим містом, де уранове виробництво Придніпровського хімічного заводу протягом 1948–1991 рр. залишило

радіаційну спадщину. Для забезпечення безпеки радіоактивних об'єктів та моніторингу радіаційного стану було створено Державне підприємство «Бар'єр».

*Хвостосховище «Дніпровське»* розташоване у заплаві річки Дніпро, приблизно за 1 км від водосховища, і належить до рівнинно-наливного типу.

Об'єкт, що експлуатувався у 1954–1968 рр., містить близько 12 млн тон відходів перероблення уранових руд. Для запобігання пилоутворенню у 1976–1980 рр. відходи були перекриті шаром фосфогіпсу завтовшки до 19 м.

З 2000 року головною організацією з координації досліджень на об'єкті став інститут ДП «УкрНДПВІпромтехнології», який розробив програми моніторингу та ліквідації радіоактивних виходів. На території об'єкта було частково створено мережу спостережних свердловин для контролю за станом підземних вод та чаші сховища. Для стабілізації найбільш небезпечної південно-східної частини дамби у 2001 році було проведено її зміцнення кам'яним матеріалом. Протягом 2009 року систему контролю розширили шляхом встановлення додаткових свердловин та тридцяти деформаційних марок для відстеження зміщень ґрунту. У 2011–2012 роках фахівці провели інструментальний контроль споруд та підготували комплексний огляд вихідних даних для майбутнього ТЕО. Важливим етапом у 2016 році стали геодезичні вишукування компанії ПВКП «Технотранспроєкт», за результатами яких складено точний топографічний план об'єкта.

Дослідження технічного стану проводилися у 2016, 2022 та 2023 роках із застосуванням комплексних геофізичних методів: ПЕМПЗ, ВЕЗ та радіаційної зйомки. Методом ПЕМПЗ дослідження проводилися за профільно-площинним варіантом (сітка 5x5 м у 2016 р. та 3x3 м у 2022-2023 рр.). Для досліджень застосовувався прилад «СІМЕІЗ» (мікропроцесорний індикатор електромагнітного поля - МІЕМП 14/4), а для обробки даних використовувалась програма з картування Surfer.

Метод ПЕМПЗ застосовується для діагностики зон з мінімальними значеннями поля, які вказують на обводнення та розущільнення матеріалів дамби. У 2016 році встановлено, що західне крило дамби було у задовільному стані, тоді як східне – у незадовільному через зону підвищеного обводнення довжиною 280 м.

Метод ВЕЗ застосовувався у точковому варіанті для перевірки аномальних зон, виявлених методом ПЕМПЗ. Метод дозволяє визначити глибину залягання ґрунтових вод та літологічну структуру. В методі ВЕЗ була використана електророзвідувальна апаратура ШЕРС-5М.

Гамма-зйомка проводилася по профілях на зовнішньому та внутрішньому бортах дамби з кроком 12 метрів дозиметром «Стріж»(2016 рік) та через 3 метри радіометром СРП-68 (2022рік). Мета – виявлення локальних радіоактивних забруднень та зон фільтрації розчинів, що містять радіонукліди. При побудові карт за програмою Surfer отримані дані групувалися за рівнями інтенсивності (від 0 до понад 201 мкР/год).

Зіставлення результатів 2016 та 2022 рр. підтвердило об'єктивність виділених зон і свідчить про підвищення обводнення тіла греблі за 6 років (рис. 3). У 2022 році виділено 33 аномальні зони розущільнення та обводнення, сконцентровані на південній та північно-східній частинах греблі. Результати

досліджень методом ВЕЗ дали змогу встановити рівень ґрунтових вод на дамбі та затвердити зони обводнення і фільтрації (рис. 4).

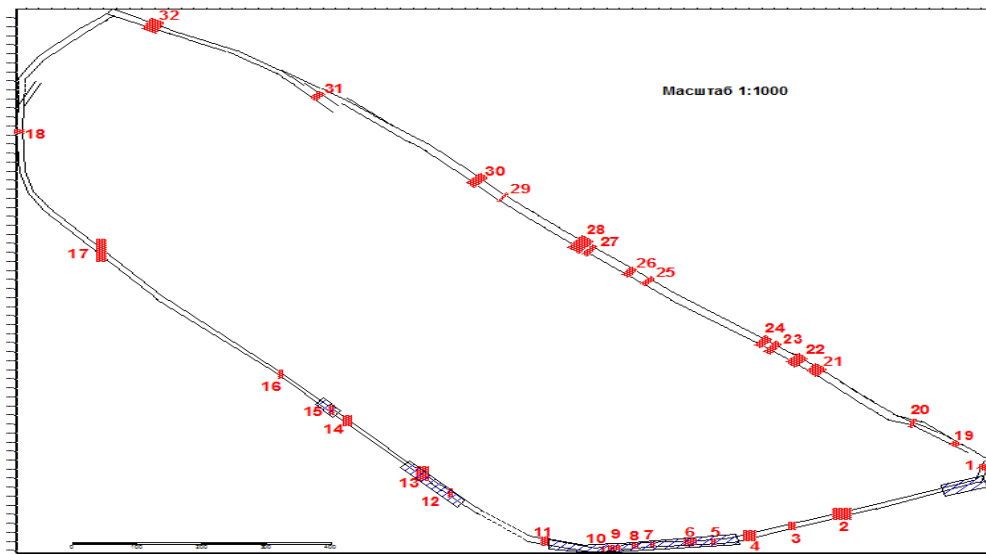
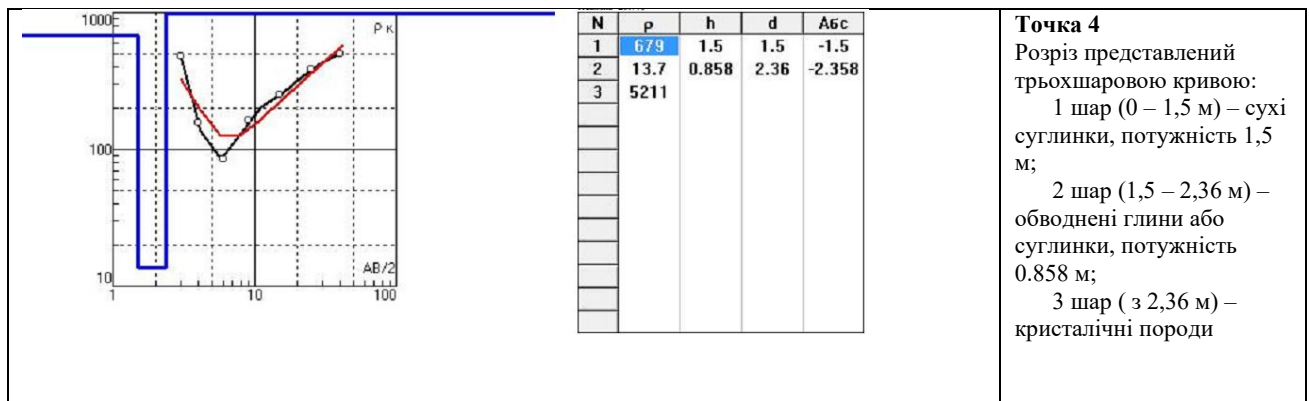


Рисунок 3 – Порівняльна схема розташування ділянок обводнення та фільтрації у греблі за результатами робіт 2022 р. (червоне) та 2016 р. (синє)



*a*

*б*

Рисунок 4 – Результати інтерпретації досліджень методом ВЕЗ за програмою IPI2Win в точці 4. *a* – вікно моделей у програмі IPI2Win: 1 – псевдокаротажна крива, 2 – крива експериментальна (чорна), 3 – крива теоретична (червона); *б* – вікно параметрів моделі

Застосування цього комплексу геофізичних методів дозволило неруйнівним способом ідентифікувати приховані зони обводнення і фільтрації, які потім були затверджені даними буріння (рис. 5).

Аналіз виділених зон показав, що найбільшу небезпеку становить зона концентрації аномалій на перегині південної ділянки греблі, оскільки світовий досвід вказує на особливу вразливість таких місць до аварій. Обводнення північної дамби, похованої під товщею відходів, пов'язане з гідродинамічним перетоком розчинів між хвостосховищем та сусідніми активними відстійниками.

Другим фактором, який впливає на зниження екологічної безпеки всього хвостосховища, є зміна клімату, що детально розглянуто у першому розділі.

Внаслідок збільшення частоти зливових дощів відбувається ерозія поверхні та тіла дамби хвостосховища (рис. 6). Ерозії сприяли розчленований рельєф та нахил поверхні хвостосховища у південно-західному напрямку. На деяких ділянках за рахунок лінійної ерозії відбувається повний розмив фосфогіпсу і на поверхню виходять відходи збагачення уранових руд, про що

свідчить підвищений рівень радіації у цих місцях. Під час зливових дощів поверхневі води накопичуються у південно-західній частині дамби, обводнюючи її, чому додатково сприяла відсутність поверхневого дренажу на хвостосховищі.

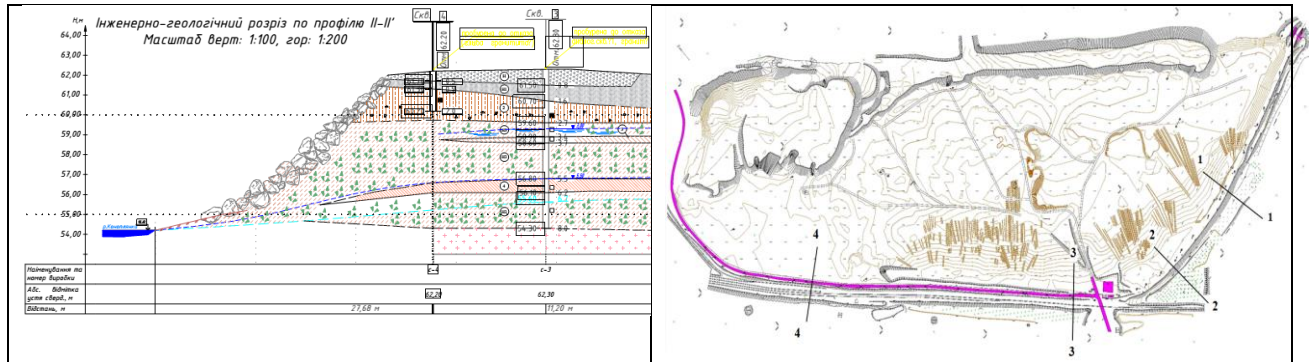


Рисунок 5 – Комплексна схема інженерно-геологічних умов. *а* – Інженерно-геологічний розріз дамби хвостосховища «Дніпровське» на ділянці по профілю II-II, *б* – Схема розташування бурових профілей. Сині пунктирні лінії – положення водоносних горизонтів

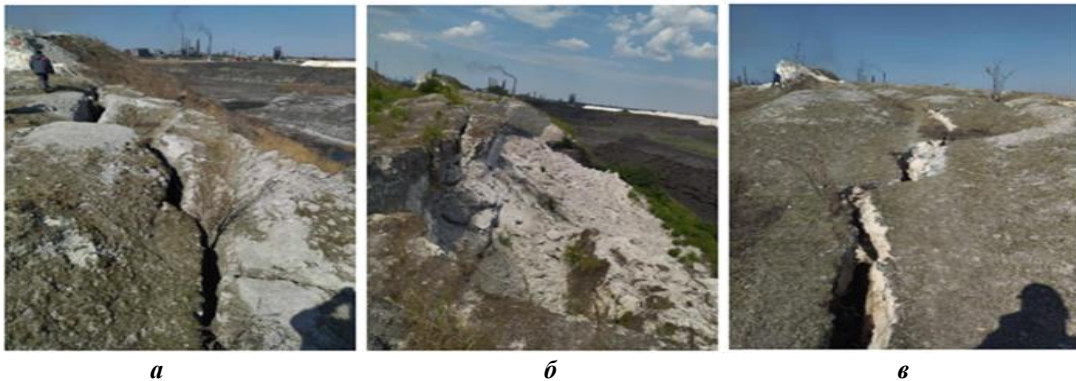


Рисунок 6 – Прояви небезпечних інженерно-геологічних явищ – обвали (*а*), зсуви (*б*) та розтріскування (*в*) потужного шару фосфогіпсу на північній дамбі хвостосховища «Дніпровське»

Після зливових дощів в липні-серпні 2023 року на найбільш обводненій частині дамби (ділянки 2-10, рис. 3) проведені дослідження методом ПЕМПЗ з метою встановлення впливу збільшення кількості та інтенсивності атмосферних опадів на її технічний стан. Методика проведення польових робіт та інтерпретації матеріалів відповідала методиці досліджень 2022 року. Аналіз даних ПЕМПЗ показує значне обводнення тіла дамби. Так, наприклад, зона 2 збільшилась на 12 метрів, 3 – на 14 м, між 3 і 4 зонами з'явилась нова протяжністю 13 м, зони 9 і 10 утворили єдину ділянку обводнення горизонтальною потужністю близько 40 метрів. Таке обводнення після злив може призвести до розвитку небезпечних техногенних явищ зсувів, суфозії і поверхневої ерозії і як наслідок спричинити руйнування дамби.

Для встановлення особливостей розміщення тріщин в зонах обводнення і фільтрації на ділянках, виявлених за даними зйомки ПЕМПЗ 2022 року, використовуючи відомі ознаки розривних порушень в геофізичних полях, виділялися зони тріщинуватості та визначалися їх азимути простягання. Просторові характеристики систем тріщин наведені на діаграмі (рис. 7).

Найбільш яскраво проявлена меридіональна система тріщин з азимутом

простягання  $0-10^\circ (\pm 5^\circ)$  та перпендикулярна до неї широтна  $80-90^\circ (\pm 5^\circ)$ , при цьому перша домінуюча. Друга за розповсюдженістю – діагональна система з азимутами простягання  $40-50^\circ$  та  $310-320^\circ (\pm 5^\circ)$ . Третя система за відносною частотою зустрічі також діагональна з азимутами простягання  $30-40^\circ$  та  $300-310^\circ (\pm 5^\circ)$ . Окремо виділяється група тріщин з напрямками простягання  $340-350^\circ (\pm 5^\circ)$ .

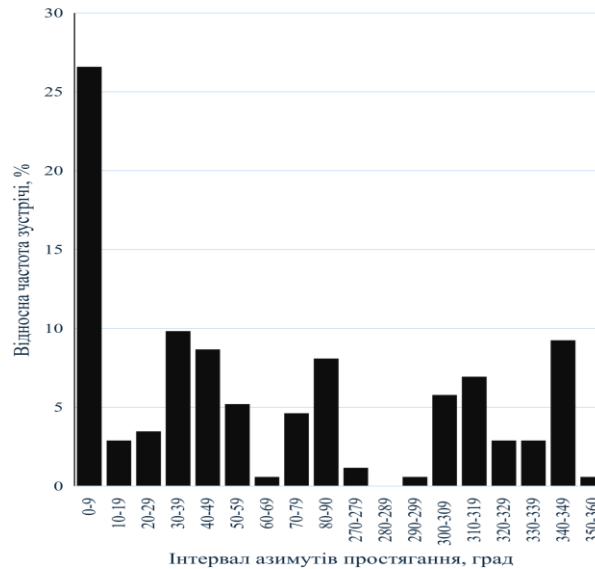


Рисунок 7 – Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища «Дніпровське»

Встановлені особливості показують, що має існувати певний фактор, яким зумовлюється формування окремих систем або напрямків тріщин.

Для розглянутої території дослідниками виявлено лінеamenti (зони активних на новітньому етапі розвитку розломів), які утворюють дві домінуючі системи, представлені прямолінійними сполученими і взаємно перпендикулярними лінеаментними зонами домінуючих напрямків ( $0^\circ$  та  $90^\circ \pm 5^\circ$ ,  $40-45^\circ \pm 5^\circ$  та  $310-315^\circ \pm 5^\circ$ ), одну проміжну ( $25-30^\circ \pm 5^\circ$  та  $295-300^\circ \pm 5^\circ$ ) та два пригнічених напрямки ( $15-20^\circ \pm 5^\circ$  та  $345-350^\circ \pm 5^\circ$ ), що мають всього по одній лінеаментній зоні. Саме вони є найбільш небезпечними ділянками, в яких відбувається активний водообмін між поверхневими і підземними водами, а зони поглинання поверхневих вод розміщуються в місцях сполучення таких лінеаментних зон (рис. 8).

Спільний аналіз діаграми тріщинуватості дамби та карти активних лінійних структур показав збіжність азимутів простягання тріщин та лінеаментних структур. Це свідчить про просторову приуроченість розвитку тріщин в зонах обводнення і фільтрації до активних на новітньому етапі розвитку розломних структур.

Науковцями встановлено, що на сучасному етапі вертикальні рухи в районі досліджень складають до  $+4$  мм/рік. Ці рухи по лінеаментних зонах є ключовим тектонічним фактором розвитку ділянок тріщинуватості, що призводить до розуцільнення ґрунтів дамб хвостосховищ та збільшення їх проникності.

Наявність зон фільтрації та обводнення свідчить про незадовільний технічний стан дамби, що вимагає невідкладних заходів для запобігання погіршенню геомеханічної стійкості та постійного комплексного дослідження.

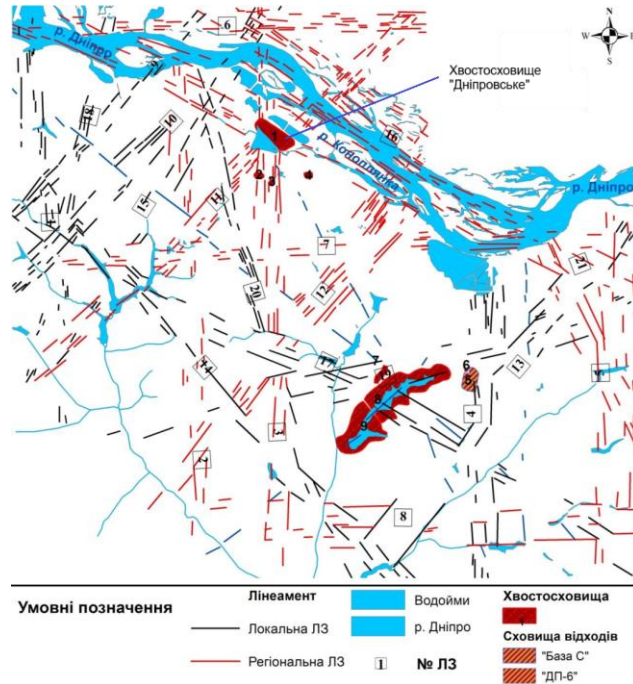


Рисунок 8 – Карта активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур в межах території розташування хвостосховищ уранового виробництва колишнього ВО «ПХЗ»

**Хвостосховище «Сухачівське»** яружно-балочного типу, розташоване за 14 км на південний схід від колишнього ВО «ПХЗ» і складається з двох послідовних секцій. Об'єкт знаходиться у лівому відгалуженні балки Розсолуватої, яка впадає у річку Суха Сура, притоку Дніпра. Перша секція (1968–1983 рр.) заповнена до проєктних позначок і містить 19 млн т відходів загальною активністю  $7,1 \cdot 10^{14}$  Бк, але не законсервована. Потужність експозиційної дози (ПЕД) гамма-випромінювання на поверхні хвостів першої секції коливається від 100 до 1 800 мкР/год. Друга секція (з 1983 року) має протифільтраційні елементи, містить 5,6 млн т відходів і перекрита поверхневим шаром низькоактивних шламів і фосфогіпсу. Хвостосховище є джерелом забруднення підземних вод, ореол якого поширюється на 370–860 м від його контуру.

Дамба ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції являє собою насип автодороги Дніпро-Кременчук. У 2004 році в дамбі через погано організований стік утворилися великі промоїни та тріщини. Незважаючи на рекультивацію ґрунтами у 2004 році, проблеми розвитку несприятливих фізико-геологічних процесів повністю не вирішені, а відсіпані ґрунти недоуцілені.

Геофізичні роботи методом ПЕМПЗ проводилися в профільно-площинному варіанті (сітка та 3x3 м) приладом «СІМЕІЗ» для визначення обводнених зон і ділянок фільтрації. За даними ПЕМПЗ виділено шість зон з різною щільністю потоку імпульсів (рис. 9).

Перша зона в цілому має знижені значення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ, що, пов'язано з невеликим обводненням порід, в яких вже сформувалися стійкі шляхи і канали фільтрації води з ділянок другої зони. Зовні вони проявляються у вигляді суфозійних воронки, провалів поверхні і підземних каналів, печер, тунелів.

Другій зоні відповідають підвищені значення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ. Тут може бути два варіанти інтерпретації геофізичних даних. У першому випадку можна припустити, що тут у період рекультивації в 2009 році

були проведені ремонтні роботи, які зумовили дуже низьке обводнення матеріалу дамби, хоча і тут виділяються окремі ділянки фільтрації води з третьої зони в першу.

Третя зона має найнижчі значення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ, що свідчить про її сильну обводненість. До цієї зони приурочені зарості очерету і прояви поверхневої суфозії (рис. 10).

Четверта зона смугою підвищених значень щільності потоку імпульсів проходить у східній частині дамби відразу за внутрішньою огорожею інспекторської дороги. Ця зона слабо обводнена, складена більш щільними породами, що пов'язано, з ущільненням дороги.

П'ята зона охоплює інспекторську дорогу і смугу території шириною 3-4 м за зовнішньою огорожею, обмежену бетонним лотком, який служить для перехоплення атмосферних вод, що стікають з автодороги. Лоток має дефекти в гідроізоляції, що обумовлює замочування порід і прояв суфозії.

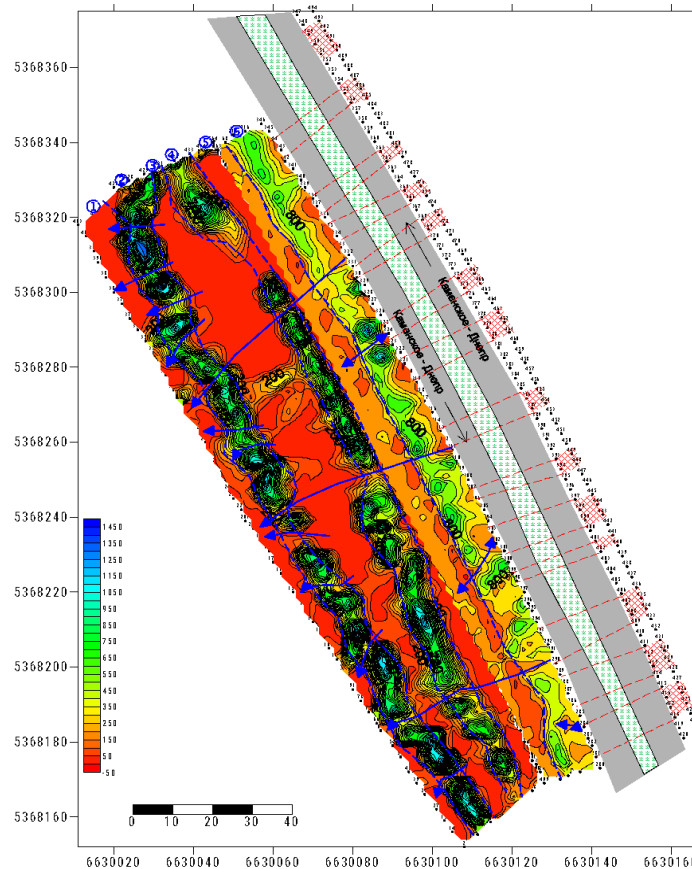


Рисунок 9 – Схема інтерпретації зйомки ПЕМПЗ. Сині пунктирні лінії і цифри в кружках – межі і номери зон пояснення в тексті). Сині стрілки – напрямки фільтрації води через тіло дамби. Червона пунктирна лінія – передбачувані зони обводнення. Система координат метрична 1942 р.

За методикою, яка використовувалася при аналізі стану екобезпеки хвостосховища «Дніпровське» побудована діаграма тріщинуватості (рис. 11). Напрями руху фільтраційних розчинів співпадають з діагональними тріщинами ( $70-79^\circ$ ), визначеними за даними ПЕМПЗ і виділеними лініаментними зонами, що вказує на вплив тектонічного фактора на процеси руйнування дамби (див. рис. 8).



Рисунок 10 – Поверхнева суфозія (а, б) в районі 3-ої зони

Подальший розвиток суфозійної зони може призвести до руйнування дамби, провалення дороги і прориву ставка, що порушить залягання радіоактивних відходів (РАВ) і спричинить розсіювання радіонуклідів. Додатковим фактором небезпеки є сейсмічна активність (5–6 балів) та динамічні навантаження від інтенсивного руху транспорту, що може спричинити зсуви і провали на дорозі.

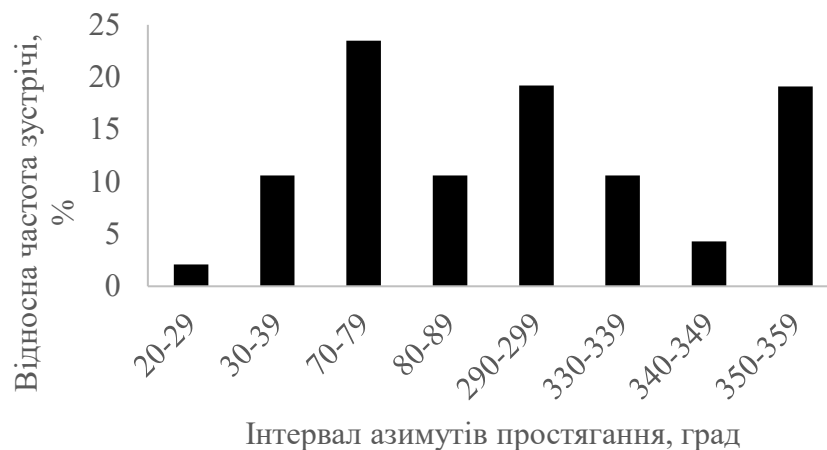


Рисунок 11 – Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища «Сухачівське»

*Хвостосховище Вільногірського ГМК у балці Скажена*, введене в експлуатацію у 1987 р., є діючим наливним хвостосховищем, що утримує близько 55 млн м<sup>3</sup> відходів. Гребля хвостосховища – глуха ґрунтова, насипна із суглинку, має клас наслідків ССЗ, а її укуси закріплені травами та кам'яним накидом.

Для моніторингу в тілі споруди облаштовано 12 п'єзометрів для визначення рівнів депресійної кривої (фільтраційного потоку). Спостереження за 2007–2011 рр. показали тенденцію до підвищення рівня фільтрації води в тілі ГТС з коливаннями до 6 м. Значне обводнення та зміна форми ліній гідроізогіпс свідчать про потенційну небезпеку експлуатації ГТС. Через це постала необхідність забезпечити стійкість низового укусу шляхом привантаження греблі гірничою масою для протидії зсувним силам.

Візуальний огляд дамби виявив широкий розвиток зсувів, лінійного змиву та замочування тіла дамби, особливо на терасах 133 м, 130 м і 127 м. Геофізичні

дослідження методом ПЕМПЗ проводились за методикою, що і на перших двох дамбах. Вони зосередилися на терасах і показали, що щільність потоку імпульсів невисока, що є свідченням значної обводненості всього тіла дамби. На картах ПЕМПЗ виділяються ділянки з підвищеними значеннями щільності потоку, які інтерпретуються як зони формування зсувів (зони відриву) через розтягуючі напруження (рис. 12).

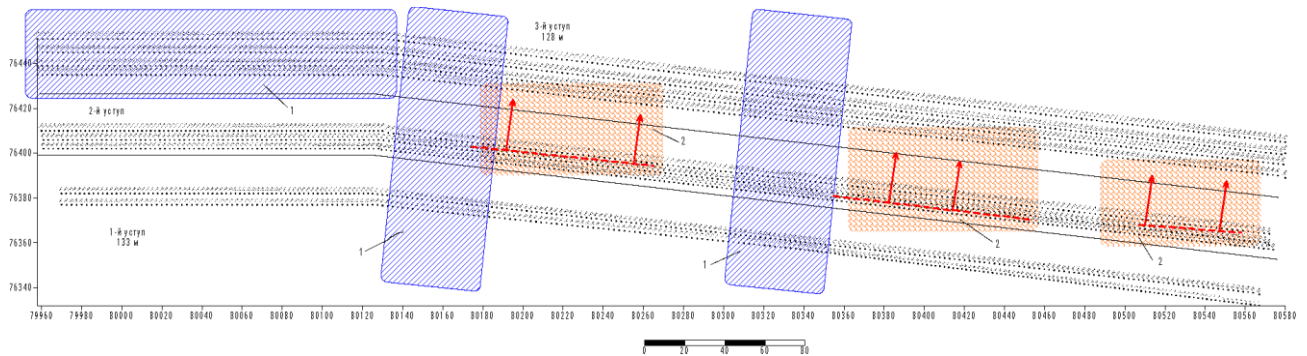


Рисунок 12 – Карта-схема результатів інтерпретації даних ПЕМПЗ дамби у балці Скажена

Ці зсувонебезпечні ділянки розділені зонами з низькими значеннями ПЕМПЗ, що вказує на формування тут зон підвищеної фільтрації води, підтверджені заболоченням (рис. 13) і стоком води (рис. 14).



Рисунок 13 – Очеретяна рослинність на болоті, з якого витікає вода. Дамба «Балка Скажена», тераса 127 м



Рисунок 14 – Промоїни на схилах терас дамби «Балка Скажена»

Першою екологічною небезпекою є сейсмічна активність (5–6 балів), яка з огляду на значну обводненість та наявність зсувонебезпечних ділянок, може призвести до руйнування дамби. Другим фактором є лінійна ерозія від злив – промоїни на схилах терас можуть призвести до розвитку ярів та сповзання привантажувальної маси. Третім фактором є тектонічний. На діаграмі тріщинуватості (рис. 15) обводненої частини дамби основними азимутами простягання є субмеридіональні, субширотні та діагональні ( $350-359^\circ \pm 5^\circ$ ;  $80-89^\circ \pm 5^\circ$ ;  $330-339^\circ \pm 5^\circ$ ).

Сумісний аналіз геологічної карти домезозойських утворень на аркуші М-36-XXXV (Дніпродзержинськ), на яку винесено розташування хвостосховищ Вільногірського ГМК у б. Скажена, «Дніпровське» та «Сухачівське» і діаграм тріщинуватості показує, що їх азимуту простягання практично повністю

співпадають з азимутами простягання розломних структур на карті. Таким чином на всіх трьох хвостосховищах підтверджується закономірна просторова приуроченість тріщин в зонах обводнення та лінеаментних зон, до докембрійських розломів, що свідчить про успадкований розвиток тектонічних структур.

Обводнення, зсувні процеси, сейсмічні та тектонічні фактори, а також ймовірні дефекти дренажних систем свідчать про критичну необхідність постійного контролю та заходів щодо управління безпечною експлуатацією ГТС.

Для системної оцінки та пріоритизації загроз використовується півкількісний підхід на основі Індексу небезпеки хвостосховищ (Tailings Hazard Index, THI) та Індексу ризику хвостосховищ (Tailings Risk Index, TRI), які розраховані за методикою UBA (Агентства Німеччини з навколишнього середовища) і представлені у табл. 1.

Індекс ризику хвостосховищ був розроблений для оцінки небезпеки потенційних аварій для населення та водних об'єктів. Найбільший індекс ризику TRI має хвостосховище «Дніпровське» – 10, бо воно знаходиться в межах м. Кам'янське, в заплаві р. Дніпро, де нижче за течією розташовано місто Карнаухівка, а далі м. Дніпро. Індекс ризику збільшується за рахунок складу хвостів.

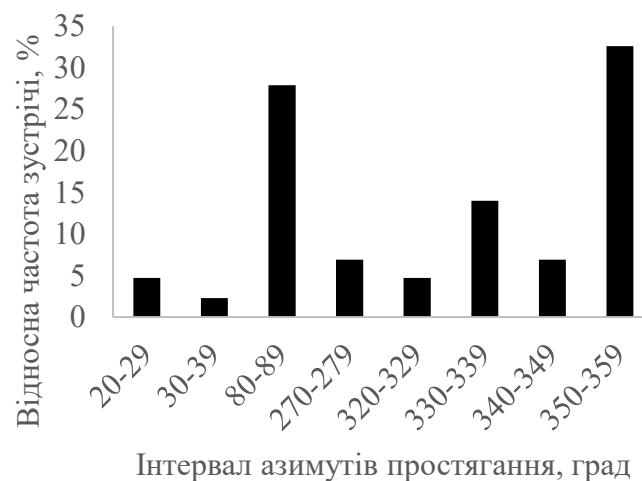


Рисунок 15 – Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища ВГМК у балці Скажена

Таблиця 1 – Загальний індекс небезпеки THI хвостосховищ

Назва хвостосховища	Обсяг хвостів, млн. м <sup>3</sup>	THI <sub>Cap</sub>	THI <sub>Tox</sub>	THI <sub>Man</sub>	THI <sub>Seism</sub>	THI <sub>Flood</sub>	THI <sub>Dam</sub>	THI
Дніпровське	5,8	6,18	4	1	1	1	0	13,18
Сухачівське	19	7,28	4	1	1	0	1	14,28
ВГМК у б. Скажена	55	7,74	1	3	1	0	1	13,74

Примітка: THI<sub>Cap</sub> – індекс небезпеки за об'ємом хвостів, THI<sub>Tox</sub> – індекс небезпеки за токсичністю речовин, що містяться у відходах, THI<sub>Man</sub> – індекс небезпеки пов'язаний з управлінням об'єктом, THI<sub>Seism</sub> – індекс небезпеки за сейсмічними умовами, THI<sub>Flood</sub> – індекс небезпеки, що враховує умови на майданчику хвостосховища, THI<sub>Dam</sub> – індекс небезпеки за стійкістю дамби

Під час бойових дій руйнування огорожувальної дамби може привести до потрапляння радіоактивних відходів у р. Коноплянка, а потім і у р. Дніпро або безпосередньо у р. Дніпро при виводі з ладу північної частини дамби

хвостосховища. Менший індекс небезпеки розрахований для хвостосховища «Сухачівське» ( $TEI=8$ ), яке розташоване далі від м. Кам'янське і р. Дніпро. Хвостосховище ВГМК у б. Скажена має  $TEI=7$ , бо воно знаходиться поряд з м. Вільногірськ з населенням від 10000 до 100000 чоловік, поблизу якого є три невеликі водосховища. Крім того, треба відзначити менш небезпечний склад хвостових матеріалів, закладених у цьому хвостосховищі. Тут небезпека для населення міста виникає тільки при руйнуванні дамби.

Індекси ТНІ та ТРІ є попередньою оцінкою рівня небезпеки та ризику, які дозволяють ефективно оцінити та ранжувати досліджені хвостосховища, що є критичним для екологічного аудиту та прийняття управлінських рішень.

У результаті вивчення умов експлуатації хвостосховищ Дніпропетровської області встановлено, що чинники зниження екологічної безпеки мають комплексний характер.

Одним з чинників підвищення рівня техногенної небезпеки хвостосховищ є сучасні зміни клімату (зростання температури на  $2,0-2,3^{\circ}\text{C}$  та зниження гідротермічного коефіцієнта прибутку на  $0,037-0,042$ ), що призводить до пересихання ґрунтового покриву дамб із подальшим тріщиноутворенням і під час інтенсивних злив зумовлює неконтрольоване перезволоження матеріалів, активізацію фільтрації та ерозійних процесів (зокрема суфозії). Це обумовлює щорічне розширення параметрів зон замочування дамб на 10-15%, яке підтверджено польовими спостереженнями та математичним моделюванням.

Другим фактором є геологічні і тектонічні особливості розташування ГТС. Тектонічна будова району розташування визначає в дамбах ГТС ступінь розвитку тріщин, максимальна кількість яких приурочена до основних глибинних розломів Українського щита ортогональної системи і пригніченої системи північно-західних напрямків з азимутами простягання  $300^{\circ}-330^{\circ}$ , за якими відбуваються сучасні рухи, що може розглядатися як тектонічний фактор підготовки дамб ГТС до проявлення небезпечних процесів. Техногенні вібрації (вибухи, рух транспорту тощо) підсилюють роль тектонічного фактору та пришвидшують фільтраційно-деформаційні процеси.

Техногенні чинники пов'язані з недоліками проектування та порушенням регламентів експлуатації.

Відсутність або неефективність дренажних систем призводить до критичного обводнення масивів відходів, перетворюючи їх на потенційно текучі субстанції. Порушення нормативних ухилів поверхні хвостосховищ (зокрема на хвостосховищі «Дніпровське») призводить до ерозії покриття радіоактивних відходів. Відсутність захисного шару (наприклад, фосфогіпсу) на відкритих ділянках призводить до інтенсивного пиління, що є особливо небезпечним для об'єктів з підвищеним радіаційним фоном. Регулярний рух транспорту по гребенях дамб створює динамічні навантаження, які ініціюють розвиток нових та розкриття існуючих тріщин, що в подальшому прискорює фільтраційну деградацію споруди.

Таким чином, ідентифіковані фактори формують основу для розробки інтегрованої системи дослідження та обґрунтування інженерних заходів щодо локалізації екологічних небезпек.

Подолання критичного розриву між стрімким погіршенням технічного

стану ГТС будь-якого призначення та методами його оцінки становить велику наукову проблему, вирішення якої дозволить прийняти оперативні рішення для зменшення усіх видів небезпек, пов'язаних з водним середовищем

Оцінка надійності цивільних гідротехнічних споруд стає невід'ємною частиною загальної стратегії захисту регіону, оскільки їхній технічний стан безпосередньо корелює з геологічними та кліматичними ризиками, ідентифікованими для промислових об'єктів.

Тривалий час експлуатації цивільних ГТС сільськогосподарського призначення (більше 50 років), а також недбале ставлення обслуговуючого персоналу призвело до значного погіршення їх технічного стану. Проведена оцінка технічного стану магістральних каналів (МК) геофізичними методами (ПЕМПЗ, ВЕЗ) дозволила встановити, що найбільший відсоток ділянок прихованої фільтрації і обводнення має МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи (ЗС) – 48, 1%, другий за неналежним технічним станом є МК-4 Солоняно-Томаківської ЗС (31,9%), а третій – МК-1 Кільченської ЗС – 29,4% . Відповідно і тектонічні умови розташування цих каналів різні. МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи приурочений до найбільш тектонічно порушених ділянок, інші два знаходяться у більш спокійних тектонічних умовах.

На 10 обстежених регулюючих басейнах довжина зон прихованої фільтрації і обводнення коливається від 26 до 131 метра , а фільтраційні втрати – від 1341 до 7950 м<sup>3</sup>/ міс.

Фільтраційні втрати з ГТС сільськогосподарського призначення приводять до підйому рівня ґрунтових вод, при цьому на прилеглих до МК територіях виникає помірний ризик підтоплення селищ, розташованих поблизу каналів, а навколо регулюючих басейнів у зв'язку зі значним погіршенням якості водних ресурсів додатковим чинником є екологічна небезпека вторинного засолення та осолонцювання ґрунтів.

Значну роль в екологічній небезпеці відіграють геологічні і тектонічні умови розташування ГТС. Отримані результати дають можливість сформулювати наступне: в умовах центральної частини Українського щита фільтраційні потоки з цивільних гідротехнічних споруд дренують по зонам тріщинуватості в найближчі яри, балки, річки. Навпаки на схилах УЩ при переході до ДДЗ в районах з великою потужністю осадового чохла фільтраційні розчини не дренують у ерозійні форми рельєфу, а по тріщинам і глибинним розломам потрапляють у підземні води, забруднюючи їх. Такий механізм слід очікувати і для гірничо-промислових ГТС, розташованих в різних геологічних і тектонічних умовах. Аналіз приведених даних свідчить, що встановлюється наступна закономірність – чим більш тектонічно порушені райони, де розташовуються канали, тим більша кількість та протяжність зон прихованої фільтрації та обводнення в них.

Унікальність дослідження полягає у розробці єдиної наукової концепції екологічної безпеки, що вперше об'єднує промислові хвостосховища та цивільні системи як взаємопов'язану гідродинамічну мережу регіону. Практична значущість такого підходу зумовлена тим, що під час бойових дій цивільні ГТС можна використовувати для водопостачання гірничо-промислових комплексів і прилеглих населених пунктів.

**Четвертий розділ** дисертації містить результати досліджень небезпечних техногенних процесів у гідротехнічних спорудах хвостосховищ.

Екологічна небезпека хвостосховища «Дніпровське» (м. Кам'янське) визначається двома чинниками: 1) загрозою для геомеханічної стійкості ґрунтових дамб через розвиток ерозійних процесів, зафіксованих візуальними обстеженнями; 2) небезпекою водної міграції радіонуклідів через дамби, обумовленої гідравлічним градієнтом, який уможливорює винос вилуговуваних радіонуклідів у р. Коноплянку, а потім у р. Дніпро.

Оцінка напружено-деформованого стану зовнішньої дамби виконана з використанням методу скінчених елементів у програмі Phase2 для чотирьох профілів, розташованих на захід і схід від моста через р. Коноплянка. Для класу відповідальності ССЗ, до якого віднесено огорожувальну споруду, нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості згідно з ДБН-В.1.2-14-2018 становить  $[k_s] = 1,25$ . Отримані за результатами моделювання значення коефіцієнта  $k_s$  в необхідному та існуючому стані перевищують нормативне  $[k_s]$  (табл. 2-3), що свідчить про достатню стійкість низових укосів дамби хвостосховища. Додаткове обводнення ґрунтової дамби призводить до зниження  $k_s$  (наприклад, до 1,580 для профілю 1-1). Найменший коефіцієнт стійкості (1,37) отримано для профілю 1-1 при урахуванні наявності шару ґрунтів з підвищеною вологістю (рис. 16) вище рівня ґрунтових вод. Однак, моделювання підтвердило збереження стійкого стану навіть при можливому підвищенні рівня води.

Оцінка стійкості огорожувальної дамби хвостосховища «Сухачівське» (секція 1) виконана з використанням моделювання напружено-деформованого стану методом скінчених елементів для двох профілів з найбільшим ухилом поверхні, біля підніжжя яких зафіксовані зони обводнення. Наявність інтервалів обводнення ґрунтів в тілі дамби сприяє розвитку суфозійних процесів і порушенню її стійкості, особливо під постійним динамічним впливом від руху автотранспорту.

Чисельним моделюванням показано, що при зменшенні питомого зчеплення ґрунтів внаслідок вібраційного навантаження коефіцієнти запасу стійкості знижуються. У статичних умовах для профілів 1 і 2 вони становлять 1,797 (рис. 17) та 2,552, а під дією динамічних навантажень зменшуються до 1,202 і 1,704 відповідно. Значення  $k_s$  для профілю 1 менше нормативного, що свідчить про недостатній запас стійкості дамби «Сухачівське» (секція 1) у критичному випадку динамічного впливу.

Таблиця 2 – Розраховані значення коефіцієнта запасу стійкості  $k_s$  (частки од.) низового укосу огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське»

Варіант розрахунку	Розрахункові (розвідувальні) профілі			
	1-1 (I-I) (150 м на захід від мосту)	2-2 (III-III) (75 м на захід від мосту)	3-3 (IV-IV) (25 м на схід від мосту)	4-4 (VII-VII) (280 м на схід від мосту)
Дамба в необхідному стані	1,744	1,978	4,758	2,613
Дамба при існуючому положенні рівня ґрунтових вод	1,580	1,695	4,758	2,613

Таблиця 3 – Розраховані значення коефіцієнта стійкості низового укосу огорожувальної дамби ВГМК на ділянці деталізації

Стан огорожувальної дамби	Коефіцієнт стійкості, $k_s$ , частки од.	
	Розрахункові (розвідувальні) профілі	
	1-1 (I-I)	2-2 (III-III)
Існуюче положення рівня підземних вод, знижені вище рівня води параметри міцності	1,532	1,667
Розрахункове положення рівня підземних вод, знижені параметри міцності в обводненій зоні	1,372	1,591

За відсутності динамічного впливу фільтрація води і поверхнева суфозія виступають головними чинниками можливого порушення стійкості дамби. Можливий підйом рівня підземних вод знижує стійкість низового укосу через зниження міцності ґрунтів в тілі дамби. Мінімальне значення  $k_s = 1,37$  отримано для ділянки дамби, де можливе підвищення рівня ґрунтових вод на 3,8 м вище його існуючого положення, що потребує контролю порового тиску при проведенні спостережень.

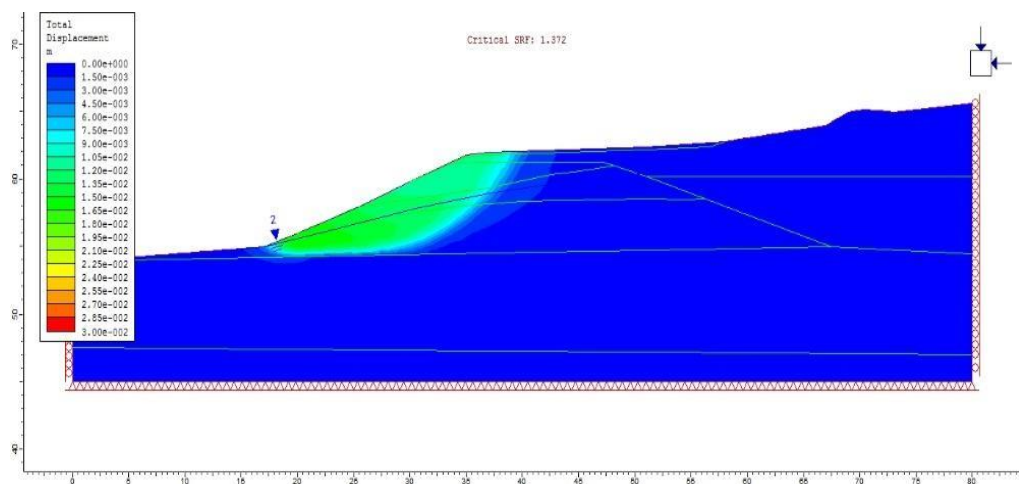


Рисунок 16 – Розподіл зсувних деформувань низового укосу огорожувальної дамби у профілі 1-1 при підйомі рівня ґрунтових вод на висоту додаткового обводнення ґрунтів ( $k_s = 1,372$ ).

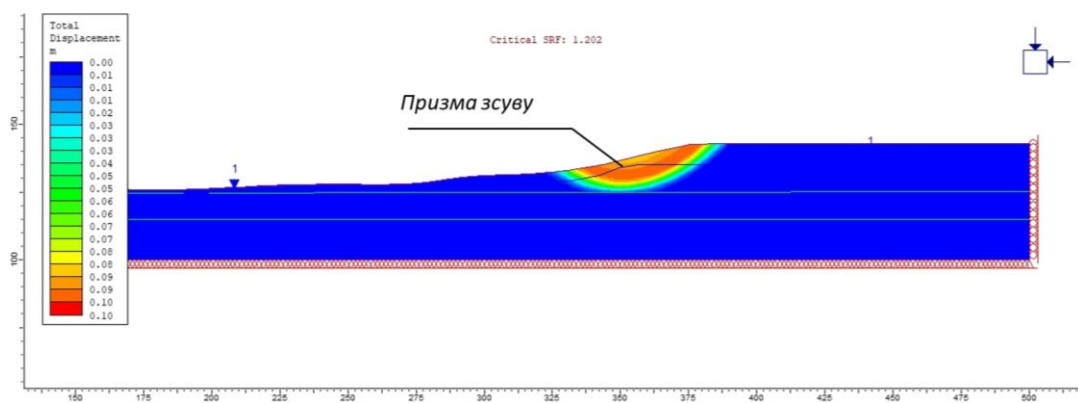


Рисунок 17 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби в умовах дії динамічного навантаження, розрахунковий профіль 1-1 –  $k_s = 1,202$

Для оцінки екологічної небезпеки водної міграції радіонуклідів з

хвостосховища «Дніпровське» використовувалися аналітичні моделі міграції, засновані на рівнянні одновимірної конвективної дифузії речовин, що розпадаються. Для довгострокових прогнозів приймалася ізотерма Генрі рівноважної сорбції, при цьому в шарі водонасичених відходів підтримується усталена концентрація. Швидкість фільтрації в діапазоні 0,09–1,67 м/добу розрахована за даними спостережень на ділянці дамби довжиною 830 м.

Питома активність радіонуклідів у шарах відходів висока, що насамперед стосується довгоживучих ізотопів уранового ряду ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ). Виміряні середньорічні концентрації радіонуклідів у поверхневих водах підвищені, але не перевищують допустимі рівні. Вміст радіонуклідів у донних відкладах р. Коноплянка також є підвищеним, при цьому найбільші значення фіксувалися для гирла р. Коноплянки. Це свідчить про наявність постійного вторинного джерела радіоактивного забруднення для р. Дніпро.

Розрахунки міграції  $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , та  $^{210}\text{Pb}$  показали, що станом на 2023 р. концентрація урану  $^{238}\text{U}$  у ґрунтових водах біля берега р. Коноплянки (рис. 18) серед інших ізотопів була найбільшою. Концентрація радію та торію у водоносному горизонті біля берегу практично не змінилася відносно фонових значень, що пояснюється їхньою вищою сорбцією.

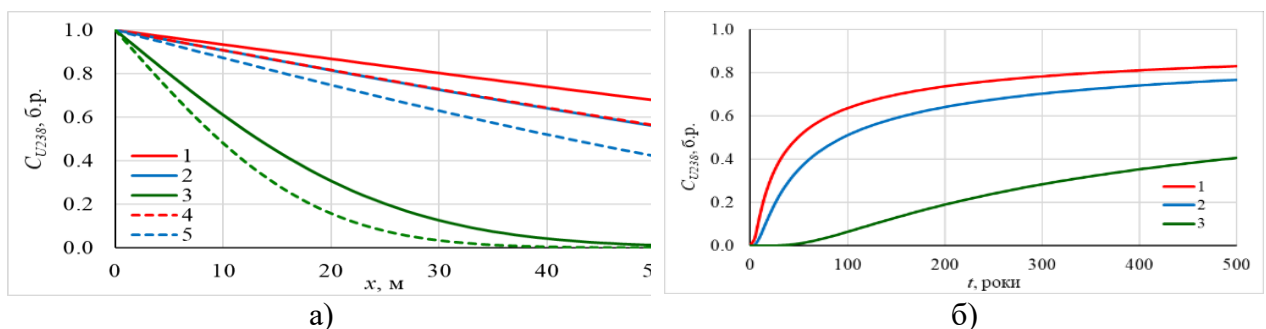


Рисунок 18 – Розраховані показники міграції  $^{238}\text{U}$  від контуру хвостосховища уздовж ліній течії ґрунтових вод до берега р. Коноплянки: а) профіль відносної концентрації уздовж ліній течії на 2023 р., б) зміна відносної концентрації у часі на вході ліній течії у р. Коноплянка. 1–5 – варіанти розрахунку для наборів параметрів «песимістичного» та «консервативного» сценаріїв прогнозу.

Прогнози міграції радіонуклідів та їх винесення до р. Коноплянки добре узгоджуються з діапазоном вимірних концентрацій радіонуклідів у поверхневих водах. Найбільшу небезпеку наразі створює уран, винос якого з хвостосховища на 50–80% підвищує його концентрацію у р. Коноплянка. Через вищу сорбцію у породах ґрунтового водоносного горизонту, порівняно з ураном, внесок інших ізотопів у зростання радіоактивності води р. Коноплянка оцінюється як незначний, хоча буде зростати у кілька разів у наступні 50 років, а винесення урану зростатиме повільніше. Вміст радіонуклідів у р. Коноплянка та Дніпро у найближчі 50 років за поточного перебігу процесів не перевищить санітарних норм через розбавлення поверхневими водами. Чинником тимчасового зростання радіоактивності у р. Коноплянка можуть бути літні посухи з мінімальною витратою води, а наявність рослинності у заплаві р. Коноплянка слід вважати чинником зменшення радіоактивності внаслідок більшої сорбції, у тому числі у донних відкладах.

Через відсутність системного гідрохімічного моніторингу р. Коноплянка

за останнє десятиріччя рекомендується поновлення відповідних спостережень. Для удосконалення геотехнічного, гідрогеологічного та радіоекологічного контролю рекомендуються заходи, що включають закладення спостережних свердловин у межах породних укосів огорожувальної дамби та на прибережній смузі, створення геодезичної станції для контролю за вертикальними й горизонтальними деформаціями укосів, регулярні візуальні обстеження відвалів, заміри рівня води в гідрогеологічних свердловинах для уточнення рівня ґрунтових вод з урахуванням сезонних коливань, відбір проб води з р.Коноплянка та Дніпро з раніше визначених пунктів контролю на вміст радіонуклідів. Для забезпечення деформаційної стійкості дамби доцільно сформувати в межах зовнішніх укосів дамби дренажний щобеневий шар, що мінімізуватиме фільтраційний виніс породного матеріалу дамби. Отримані дані дозволять уточнити моделі розвитку деформацій дамби та водної міграції.

**У п'ятому розділі** розроблено і запропоновано технічні рішення підвищення рівня екологічно безпечної експлуатації ГТС.

Для забезпечення екологічної безпеки нових радіоактивних хвостосховищ в Україні рекомендується перехід від застарілих методів діагностики до проактивного управління екологічною небезпекою на всіх етапах життєвого циклу об'єктів. Новітні методи складування хвостів на нових хвостосховищах зосереджені на економії води та повній відмові від небезпечних наливних дамб. Найбільш екологічним підходом є сухе складування, де зневоднені фільтр-пресами відходи вкладаються стійкими штабелями. Пастове згущення дозволяє створювати стабільні конуси відходів, що мінімізують випаровування та фільтрацію шкідливих речовин у ґрунт. Гібридна технологія гідравлічного сухого складування забезпечує швидке дренажування пульпи через інтегровані піщані шари. Впровадження цих інновацій дозволяє повернути до 85% технічної води у виробничий цикл і значно знизити екологічну небезпеку.

Для стабілізації застарілих хвостосховищ застосовують методи зміцнення конструкцій та хімічного закріплення поверхонь. Технологія струминної цементації дозволяє створювати внутрішні бетонні опори в тілі дамб, запобігаючи їх руйнуванню. Системи вертикального дренажу та вакуумування ефективно виводять надлишкову вологу, що консолидує масив відходів і знижує внутрішній тиск. Поверхнева ізоляція геосинтетичними мембранами або біополімерами зупиняє ерозію та перешкоджає розвіюванню токсичного пилу вітром.

Впровадження автоматизованих та інформаційно-діагностичних систем забезпечує збір і аналіз даних у реальному часі для прогнозування аварійних ситуацій. Для захисту пульпопроводів від абразивного зносу рекомендовано використовувати труби з полімерним футеруванням та автоматизоване регулювання швидкості потоку. Такий комплексний підхід мінімізує ймовірність розгерметизації систем і забезпечує надійний захист довкілля від радіаційного забруднення.

Хвостосховище «Дніпровське» становить критичну загрозу через інфільтрацію опадів, що спричиняє вимивання радіонуклідів та втрату стійкості дамб. Рациональним рішенням є рекультивація об'єкта шляхом створення багатошарового протифільтраційного покриття для повної ізоляції відходів. Технічне рішення передбачає:

1. Вирівнювання поверхні фосфогіпсом із формуванням ухилів для організованого водовідведення через систему ловчих каналів (рис. 19).

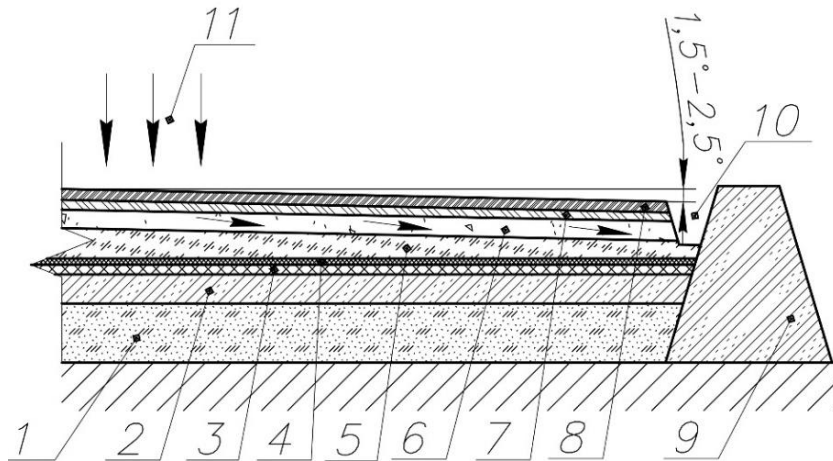


Рисунок 19 – Проектна схема улаштування протифільтраційного покриття хвостосховища РАВ «Дніпровське»

1 – РАВ, 2 – спланований шар фосфогіпсу, 3 – гідроізоляційний шар, 4 – геотекстиль, 5 – глина, 6 – піщано-гравійний дренаж, 7 – суглинок, 8 – родючий ґрунт, 9 – захисна дамба обвалування, 10 – ловчий канал, 11 – атмосферні опади та тала вода

2. Облаштування гідроізоляційного шару – влаштування по периметру гідроізоляційного шару з радіаційно стійкого матеріалу товщиною 1 – 2 мм.

3. Формування водонепроникного бар'єру – нанесення на гідроізоляцію, пошарове насипання та ущільнення глини загальною товщиною 0,3 – 0,5 м.

4. Створення ухилу – встановлення кута нахилу протифільтраційного покриття у межах  $1,5^{\circ}$  –  $2,5^{\circ}$  (від центру до дамб обвалування) для забезпечення самопливного відведення талих та атмосферних вод.

5. Влаштування дренажу – формування та ущільнення над водонепроникним шаром піщано-гравійного дренажу товщиною 0,3 – 0,4 м.

6. Формування суглинкового шару (проміжний шар) – поступове насипання та ущільнення проміжного суглинкового шару товщиною 0,2 – 0,3 м, який слугує основою для фінального родючого шару та/або забезпечує необхідну капілярну підпірку.

7. Створення біологічного шару – поверхня покривається родючим ґрунтом (гуміфікований ґрунт або чорнозем) товщиною 0,15–0,2 м, який засівається багаторічними травами із потужною кореневою системою.

8. Облаштування водовідведення – по периметру захисного шару створюються дренажні та ловчі канали для організованого збору та відведення води.

Застосування такої методики рекультивації сховищ відходів уранопереробних виробництв дозволить підвищити якість захисту протифільтраційного покриття та мінімізувати техногенний вплив об'єкта на навколишнє середовище.

Для посилення бар'єрних функцій пропонується інтеграція композитних геосинтетичних матеріалів, зокрема геомембран та бентонітових матів (GCL). Поєднання геосинтетичного екрана з традиційними глиняними замками створює дубльовану систему захисту, стійку до деформацій та суфозії. Такий

комплексний підхід гарантує довгострокову радіаційну безпеку навіть у разі природної деградації ґрунтових шарів.

Для підвищення стійкості дамби хвостосховища «Сухачівське» ІС пропонується згладжування укосів або влаштування розвантажувальних призм із крупнозернистого ґрунту в підшві, зниження порового тиску через горизонтальний дренаж та зміцнення конструкцій георешітками з анкерним кріпленням.

Ефективним інженерним заходом є улаштування горизонтального дренажу, наприклад, дренажних призм або берм у підшві укосу. Цей захід має на меті зниження рівня ґрунтових вод та критичного фільтраційного тиску, що є ключовим фактором стійкості. Крім того, стійкість підвищують закріпленням укосу шарами дренуючого матеріалу (зворотні фільтри), що забезпечує організоване відведення фільтраційних вод.

Комплексний захист від ерозії та пилення забезпечується поєднанням біологічної рекультивації, мульчування та фізичних методів стабілізації поверхні.

Поверхню низового укосу необхідно укріплювати покриттям для захисту від атмосферних опадів та поверхневої ерозії. Для цього використовують дернування, посів трав, кам'яне накидання або бетонні плити. Перевагу рекомендується надати біологічним способам рекультивації. За необхідності може бути проведене підвантаження нижнього укосу, яке виконується за допомогою кам'яного накидання, плит або інших важких матеріалів. Додатково, для закріплення відсипаного ґрунту з боку низового укосу облаштовують упорну призму або зуб в основі дамби

Технічне рішення рекультивації відпрацьованих хвостосховищ уранопереробних виробництв включає облаштування над хвостосховищем шаруватого захисту з дренажу, водотривкого та родючого шару ґрунту. Для запобігання потраплянню атмосферних опадів і талих вод у відходи, по периметру хвостосховища облаштовують уловлювальні канали та захисний гідроізоляційний шар із радіаційно стійкого еластомірного матеріалу, наприклад гуми, товщиною 3-5 мм, поверх якої укладають геотекстиль та насипають глинистий шар товщиною 0,9-1,0 м з кутом нахилу від центра до країв хвостосховища  $1,5^\circ$ - $2,5^\circ$  і пошарово ущільнюють методом прикатування та формують родючий шар ґрунту з висівом багаторічних трав.

Для підвищення стійкості греблі **Вільногірського ГМК** обґрунтовано створення протифільтраційної завіси методом ін'єктування, що дозволяє знизити критичний пороговий тиск і рівень кривої депресії. Одне із технологічних рішень приготування розчину для протифільтраційної завіси включає глину, бокситовий шлам, золу ТЕС і воду. Додатково вводяться дистилерна рідина (відхід виробництва кальцинованої соди). Розрахунки підтвердили технічну ефективність цього рішення, яке передбачає нагнітання 4,6 тис. м<sup>3</sup> глиноцементного розчину через мережу свердловин для надійної стабілізації гідротехнічної споруди.

В майбутньому, після закриття хвостосховища пропонується технічне рішення або спосіб рекультивації хвостосховища, що включає вирівнювання поверхні хвостосховища, перекриття шаром піску, обробленого гідрофобною

рідиною. Послідовне вкладання водоутримуючого шару глинистих ґрунтів. При досягненні проектних розмірів хвостосховища його поверхню намулюють трикомпонентною сумішшю: відходи збагачення фабрик, комунально-побутові стічні води і лесоподібні суглинки у співвідношенні 1:2:1.

Для запобігання пиленню запропоновано наступне технічне рішення – спосіб біологічного закріплення хвостосховищ, що включає нарізання борозен на поверхні хвостосховища, в які вкладають живці з добре розвиненими вертикальними ростками, що взяті від материнської рослини очерету південного, а потім засипають хвостами з наступним ущільненням. Борозни орієнтують перпендикулярно напрямку переважаючих вітрів. В міжряддях ростків очерету висівають сою кормову.

Інший варіант інженерно-технічного рішення – спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ включає розробку м'яких порід розкриву у процесі відвалоутворення, між суміжними відвальними заходками у виробленому просторі формують робочі ділянки хвостосховища, які заповнюють рідкими відходами збагачення з видаленням профільтрованих вод до акумулюючої ділянки хвостосховища. Проводять формування техногенного едафотопу, при якому намивають на фільтруючу поверхню сухих пляжів з dna хвостосховища глинисту пульпу шаром 4-12 см. При підсиханні глинистої маси проводять фрезерний обробіток техногенного едафотопу, після чого перемішують глину та пісок шаром 14-20 см. Проводять посів багаторічних бобових та тонконогових трав з внесенням певного мінерального добрива.

Наступне технічне рішення – спосіб рекультивації хвостосховищ, що включає вирівнювання поверхні хвостосховища різнозернистим матеріалом, перекриття шаром піску, обробленого гідрофобною рідиною, послідовне вкладання водоутримуючого шару глинистих ґрунтів. Відходи збагачення залізних руд перекривають намиванням органічних осадів міських стоків шаром 5...15 см

Основними проблемами Дніпровського та Вільногірського хвостосховищ є надмірне зволоження відходів і зниження стійкості дамб, що потребує впровадження економічно виправданих інженерних рішень. Для Дніпровського хвостосховища найбільш доцільним визнано проект багатошарового покриття вартістю 14,5–16,0 млн доларів США, реалізація якого потребує міжнародної підтримки, зокрема від МАГАТЕ.

На Вільногірському ГМК оптимальним рішенням є створення ін'єкційної протифільтраційної завіси, орієнтовною вартістю 22 млн грн забезпечує кращу стабілізацію ГТС порівняно з привантаженням укосів.

Використання цих методів дозволяє ефективно знизити фільтраційні втрати та поровий тиск, гарантуючи довгострокову екологічну безпеку обох підприємств.

Класифікація типових технологічних рішень з модернізації, стабілізації та рекультивації гідротехнічних споруд хвостосховищ залежно від їхнього експлуатаційного стану та рівня екологічної небезпеки наведена на рис. 20.

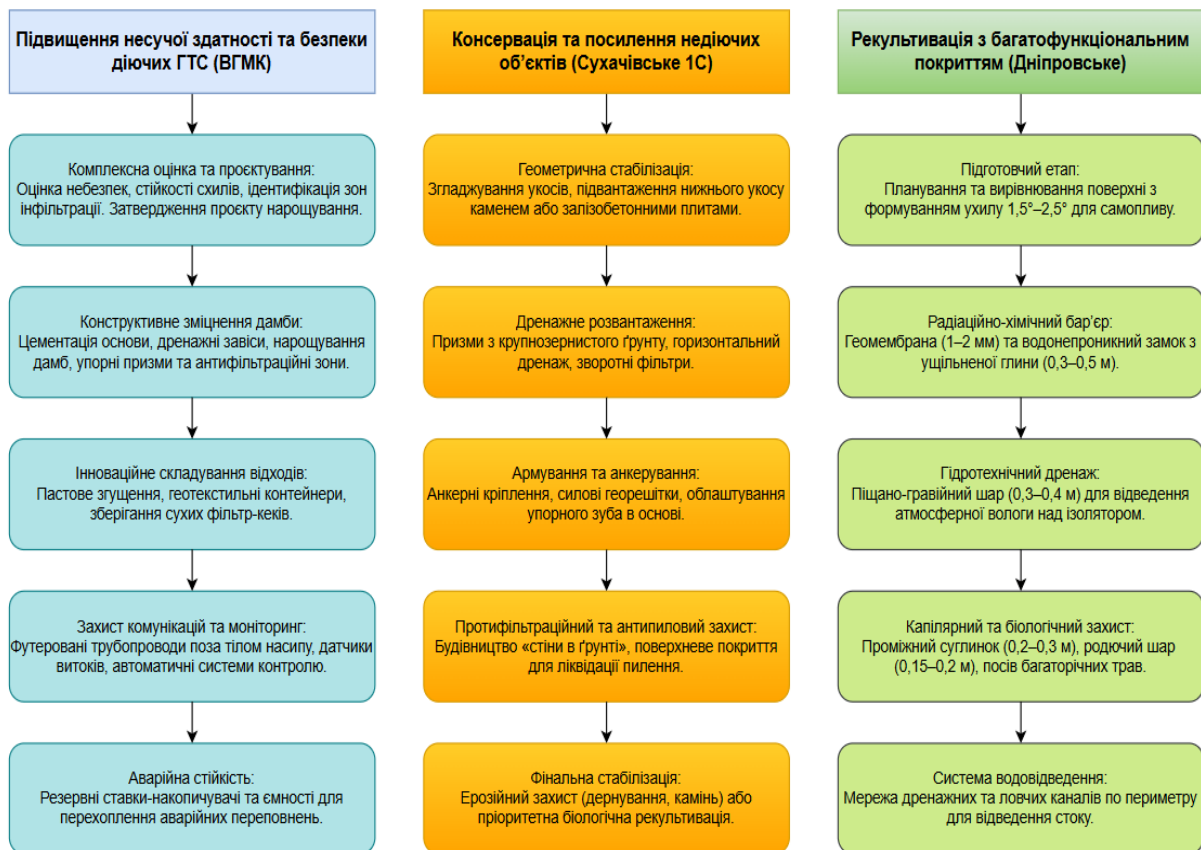


Рисунок 20 – Класифікація типових технологічних рішень з модернізації, стабілізації та рекультивации гідротехнічних споруд хвостосховищ залежно від їхнього експлуатаційного стану та рівня екологічної небезпеки

Таким чином, комплексний підхід до модернізації гідротехнічних споруд, що включає впровадження систем спостереження, застосування геосинтетичних бар'єрів та перехід до маловодних технологій складування (пастоподібне складування), дозволяє забезпечити екологічну безпеку на всіх етапах життєвого циклу об'єктів, досягаючи балансу між економічною ефективністю та міжнародними стандартами радіаційного захисту.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено нову актуальну наукову проблему з розробки науково-технічних засад управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення, які ґрунтуються на закономірностях трансформації фільтраційного режиму та гідрогеомеханічної стійкості огорожувальних дамб під впливом комбінованих техногенних, кліматичних та військових чинників, що дає можливість інтегрувати промислові та цивільні об'єкти у єдину захисну гідродинамічну систему і є підґрунтям для забезпечення сталого розвитку промислових регіонів та реалізації стратегії повоєнного відновлення України.

Основні наукові та технічні результати полягають у такому:

1. На основі системного аналізу стану експлуатації промислових хвостосховищ та цивільних іригаційних систем в Україні, зокрема у Дніпропетровській області, виявлено критичне погіршення їхньої експлуатаційної надійності. У ході досліджень встановлено глибокий розрив між деградацією технічних параметрів огорожувальних дамб і застарілими

методами контролю, що не дозволяють здійснювати превентивний моніторинг фільтраційних та деформаційних процесів. Зважаючи на це, обґрунтовано гостру актуальність вирішення масштабної проблеми створення інтегральної методології управління екологічною безпекою сумісного функціонування промислових і цивільних гідротехнічних споруд, що безпосередньо відповідає завданням Стратегії сталого розвитку держави та плану повоєнної відбудови України.

2. За результатами систематичного огляду літературних джерел з технологій забезпечення екологічної безпеки та експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд виявлено, що наявні підходи здебільшого зосереджені на фрагментарному оцінюванні промислових об'єктів без урахування їхньої взаємодії з меліоративними системами. У ході критичного аналізу публікацій встановлено відсутність інтегральних методологій, які б поєднували експрес-діагностику прихованих зон фільтрації методами неруйнівного контролю із прогностичним математичним моделюванням напружено-деформованого стану дамб в умовах зміни клімату та підвищених техногенних ризиків. На основі окресленого наукового розриву спрогнозовано перспективні напрями досліджень, що полягають у розробці єдиних науково-технічних засад проактивного управління екологічною безпекою сумісного функціонування промислових і цивільних гідротехнічних споруд як взаємопов'язаної гідродинамічної мережі регіону.

3. Встановлено, що ключовими факторами виникнення надзвичайних ситуацій на промислових гідротехнічних спорудах є фізичне старіння конструкцій, тривала експлуатація поза межами проектних ресурсів і систематичне перевищення потужностей. Статистично доведено, що найбільш уразливими є намівні конструкції (51,2% від усіх інцидентів), де основними безпосередніми причинами руйнувань виступають порушення стійкості схилів дамб, сейсмічні коливання та переповнення чаші накопичувачів через інтенсивні опади.

4. Виявлено, що сучасна зміна клімату (зокрема, підвищення середньої температури та паводки зливого характеру) суттєво знижують коефіцієнт стійкості споруд. За умов тривалих посух відбувається пересихання ґрунтового покриву дамб із подальшим тріщиноутворенням, а наступні інтенсивні зливи призводять до неконтрольованого перезволоження матеріалів, активізації внутрішньої фільтрації та ерозійних процесів (суфозії), що щороку розширює зони замочування дамб на 10–15%.

5. Доведено високу ефективність та доцільність інтеграції неруйнівних геофізичних методів у систему постійного еколого-технічного моніторингу ГТС. Комплексне поєднання методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі для локалізації прихованих зон фільтрації та тектонічних мікропорушень, вертикального електричного зондування для фіксації рівнів залягання ґрунтових вод та радіометрії для контролю міграції небезпечних речовин створює надійну інформаційну основу для оперативного аудиту технічного стану об'єктів.

6. Розроблено та теоретично обґрунтовано комплексну методіку діагностики ГТС, яка поєднує прогностичну та розрахункову складові. Метод базується на інтеграції даних тектонічного аналізу тріщинуватості району

розташування об'єкту (з урахуванням впливу глибинних розломів Українського щита й техногенних вібрацій) та математичних моделей напружено-деформованого стану в програмних комплексах чисельного моделювання, що дозволяє виявляти критичні деформації на ранніх стадіях.

7. Виконано оцінку геомеханічної стійкості дамб хвостосховищ «Дніпровське» і «Сухачівське». За методологією UBA розраховано загальні індекси небезпеки (ТНІ) та ризику (ТРИ), де найвищий рівень загрози зафіксовано для хвостосховища «Дніпровське» (ТНІ = 13,18; ТРИ = 10) через його розташування у заплаві р. Дніпро.

8. На основі комп'ютерного моделювання водної міграції радіонуклідів встановлено, що фронт уранового забруднення від хвостосховища «Дніпровське» наразі не досяг берегової лінії річки Коноплянка, проте динаміка його поширення створює довгострокову потенційну загрозу для гідродинамічної мережі регіону. Обґрунтовано, що упередження екологічних ризиків і забруднення водних об'єктів вимагає негайного відновлення та модернізації системи комплексного гідрохімічного моніторингу підземних і поверхневих вод у зоні впливу об'єкта.

9. Визначено, що для забезпечення довгострокової екологічної безпеки нових об'єктів необхідний перехід до пастового згущення та сухого складування відходів, що дозволяє повертати до 85% води у цикл та відмовитися від наливних дамб. Для застарілих та діючих споруд підтверджено високу інженерно-економічну ефективність таких заходів, як формування протифільтраційних завіс за технологією струминної цементації, створення протифільтраційних екранів, а також облаштування зовнішніх щебневих дренажних шарів для запобігання суфозійному виносу матеріалу.

10. Сформульовано та обґрунтовано засади нової наукової концепції, яка вперше пропонує розглядати промислові хвостосховища та цивільні меліоративні системи як єдину взаємопов'язану гідродинамічну мережу регіону. Доведено наявність кумулятивного ефекту підтоплення територій та обґрунтовано можливість використання ресурсного потенціалу цивільних ГТС як превентивних інженерних бар'єрів для оперативного перехоплення токсичних фільтраційних витоків або для резервного водопостачання промислових комплексів і населених пунктів під час кризових періодів та бойових дій.

11. Забезпечено надійний контроль деформаційних і фільтраційних процесів на критичних об'єктах гідротехнічної інфраструктури Дніпропетровської області – зокрема на хвостосховищі радіоактивних відходів «Дніпровське» та магістральних каналах Вищетарасівської, Кільченської й Солоняно-Томаківської меліоративних систем – шляхом практичного застосування розроблених науково-технічних засад проактивного управління екологічною безпекою. Технічне впровадження запропонованих протифільтраційних рішень у діяльність Державного підприємства «Бар'єр» і Регіонального офісу водних ресурсів у Дніпропетровській області дозволило оперативно локалізувати приховані дефекти дамб, мінімізувати ризики забруднення річки Коноплянка.

12. Доведено високу економічну та екологічну доцільність інтеграції розроблених рішень, що підтверджено розрахунками вартості оптимального

проекту багатошарового захисного покриття для хвостосховища «Дніпровське» в межах 14,5 – 16,0 млн. доларів США. Встановлено, що впровадження комплексної методики превентивного дослідження та інструментів діагностики прихованих дефектів дамб забезпечує стійке зниження витрат підприємств на поточний експлуатаційний контроль гідротехнічних споруд на 25–30%. Обґрунтовано, що очікуваний екологічний ефект від запобігання потенційним гідродинамічним аваріям та мінімізації фільтраційного забруднення підземних і поверхневих вод дозволяє упередити ймовірні збитки навколишньому середовищу регіону на суму понад десятки мільйонів гривень.

Отже, сформульовані науково-технічні засади дозволили перейти від пасивного спостереження до проактивного забезпечення екологічної безпеки хвостосховищ, що базується на врахуванні технологічних рішень з модернізації, стабілізації та рекультивації гідротехнічних споруд хвостосховищ у їх взаємодії із динамічним геологічним середовищем.

Таким чином, дисертація є завершеною науковою роботою, в результаті якої вирішена актуальна науково-технічна проблема управління екологічною безпекою ГТС гірничопромислового комплексу.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографії*

1. Pikarenia, D. S., Orlinska, O. V., & **Rudakov, L. M.** Evaluation Of The Technical Condition Of The Enclosing Dam Of The Dniprovske Tailings Dump By Geophysical Methods. Miningmetaltech. Izdevnieciba “Baltija Publishing”2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education (с. 182–199). <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10>. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні польових робіт геофізичними методами та участь в інтерпретації геофізичних матеріалів.*

2. **Рудаков Л. М.** Кліматоп та космічні фактори динаміки агроєкосистем / Л. М. Рудаков // Розвиток Придніпровського регіону: агроєкологічний аспект: монографія / за заг. ред. проф. А.С. Кобця ; відп. ред. проф. Д. М. Онопрієнко та ін. / Дніпровський ДАЕУ. – Дніпро: Ліра, 2021. – С. 77-80. – Режим доступу : <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/6333>.

### *Статті у виданнях, включених до Web of Science Core Collection та Scopus*

3. **Rudakov, L. M.,** Napich, H. V., Orlinska, O. V., Pikarenia, D. S., Kovalenko, V. V., Chushkina, I. V., & Zaporozhchenko, V. Y.. Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of irrigation systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2020. №29(4), 776–788. <https://doi.org/10.15421/112070> (індексується базою даних *Web of Science Core Collection*). *Особистий внесок здобувача полягає у зборі, опрацюванні, аналізі проблемних питань технічної експлуатації та екологічної безпеки гідротехнічних споруд зрошувальних систем, участь в інтерпретації геофізичних матеріалів у виділенні зон обводнення і фільтрації.*

4. Rudakov, D., Pikarenia, D., Orlinska, O., **Rudakov, L.,** & Napich, H.. A predictive assessment of the uranium ore tailings impact on surface water

contamination: Case study of the city of Kamianske, Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2023. 268-269, 107246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107246> (Q2, індексується базою даних **Scopus**). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці схеми процесу впливу хвостосховищ уранових руд на забруднення поверхневих вод.*

5. Tymoshchuk, V., **Rudakov, L.**, Pikarenia, D., Orlinska, O., & Napich, H. Analyzing stability of protective structures as the elements of geotechnical tailing pond safety. *Mining of Mineral Deposits*, 2021. 17(4), 116–122. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.116> (Q2, індексується базою даних **Scopus**). *Особистий внесок здобувача полягає у розрахунку стійкості огорожувальних дамб за програмою Phase 2.*

6. Napich, H., Pikarenia, D., Orlinska, O., Kovalenko, V., **Rudakov, L.**, Chushkina, I., Maksymova, N., Makarova, T., & Katsevych, V. Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2(10 (116)), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167> (Q3, індексується базою даних **Scopus**). *Особистий внесок здобувача полягає в аналізі системи технічної діагностики та екологічно безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд на малих річках.*

7. Orlinska, O., Pikarenia, D., **Rudakov, L.**, & Napich, H. Local and Regional Tectonic Influence of Territory on Geohazard of Dam of Radioactive Waste Tailings (Ukraine). *GeoHazards* 2026, 7(1), 18, <https://doi.org/10.3390/geohazards7010018> (Q3, індексується базою даних **Scopus**). *Особистий внесок заключається в аналізі даних, підготовці та систематизації матеріалів та участь в інтерпретації геофізичних матеріалів.*

8. Pikarenia, D., Orlinska, O., Napich, H., **Rudakov, L.**, Chushkina, I., & Mazurenko, R. (2024). Utilization of phosphogypsum from industrial dumps as an element of environmentally safe energy- and resource-conserving technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012053> (Q4, індексується базою даних **Scopus**). *Особистий внесок полягає в обґрунтуванні екологічних критеріїв безпечного використання утилізованого фосфогіпсу з промислових відвалів, участі у проведенні та систематизації матеріалів експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів для формування висновків статті.*

9. Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Maksymova, N., Napich, H., **Rudakov, L.**, Roubík, H., & Rudakov, D. (2022). Features of water seepage from the retention basins of irrigation systems with different geological structures. V *Industrial, Mechanical And Electrical Engineering*. Air publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0109330> (Q4, індексується базою даних **Scopus**). *Особистий внесок полягає у розробці науково-методичного підходу до оцінювання фільтраційних процесів в регулюючих басейнах, безпосередній участі в інструментальних геофізичних вимірюваннях на об'єктах досліджень.*

#### **Статті у наукових фахових виданнях України**

10. Napich, H., Pikarenia, D., **Rudakov, L.**, Maximova, N., & Makarova, T.. Оцінка ризику аварії та розрахунок процесу руйнування ґрунтової греблі хвостосховища. *Комунальне господарство міст*, 2020. № 3(156), 99–104.

<https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104> *Особистий внесок полягає в участі у польових роботах, аналізі даних.*

11. Orlinska, O., Pikarenya, D., Napich, H., Maksymova, N., **Rudakov, L.**, & Chushkina, I. Оцінка технічного стану та екологічної безпеки експлуатації магістрального каналу Кільченської зрошувальної системи. *Збірник наукових праць НГУ*, 2020. № 60, 186–195. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.186> *Особистий внесок заключається в участі у польових роботах, аналізі даних, підготовці та систематизації матеріалів для написання статті.*

12. Chushkina, I., Rudakov, D., Orlinskaya, O., Napich, H., Maksimova, N., & **Rudakov, L.** Порівняльна оцінка та удосконалення розрахунку фільтраційних втрат води з регулюючих басейнів зрошувальних систем. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 202). №34, 37–43. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.34.37-43> *Особистий внесок полягає в участі у польових роботах, підготовці та систематизації матеріалів.*

13. **Рудаков Л.М.** Оцінювання рівня екологічної безпеки хвостосховища радіоактивних відходів із застосуванням контрольних списків. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*, 2023. №2 (47), С.107-111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.17>

14. **Рудаков Л.М.** Екологічна та експлуатаційна безпека хвостосховищ: аналіз аварій, причин та методів діагностики технічного стану. *Екологічна безпека та природокористування*, 2023. 46 № 2, С.66-84. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.66-84>

15. **Рудаков Л.М.** Дніпровське хвостосховище: історія, сучасна небезпека, методи контролю і заходи для захисту довкілля. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. №78. С. 174-185. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.174>

16. **Рудаков Л.М.** Обґрунтування технічних заходів з рекультивації хвостосховища радіоактивних відходів *Збірник наукових праць НГУ* 2024. №79. С. 302-315. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.302>

17. **Рудаков Л.М.** Вплив змін клімату на гідрологічний режим водозбору та екологічну безпеку Дніпровського хвостосховища. 2025. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, №(49), С.48–52. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.49.38-52>

18. **Рудаков Л.М.**, Пікареня Д.С., Орлінська О.В., Гапіч Г.В. Діагностика технічного стану ґрунтової дамби хвостосховища Вільногірського ГМК геофізичними методами та заходи з підвищення рівня екологічно безпечної експлуатації. *Збірник наукових праць НГУ*. 2025. №80. С. 324–335. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.324> *Особистий внесок заключається в аналізі даних, підготовці та систематизації матеріалів.*

19. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Д.В., **Рудаков Л.М.**, Подопригора П.В. Роль тектонічного фактору у підвищенні екологічної безпеки хвостосховищ. *збірник НЖМП. Серія: Технічні науки*, № 4, 2025. С. 40-49. [DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-5](https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-5) *Особистий внесок полягає в участі у польових роботах, аналізі та систематизації даних.*

20. **Рудаков Л.М.**, Чушкіна І.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Геологічні та тектонічні фактори впливу на технічний стан гідротехнічних споруд цивільного призначення. *Збірник наукових праць НГУ*. 2025. №82. С.129-138.

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.129> *Особистий внесок заключається в аналізі даних, підготовці та систематизації матеріалів.*

**Патенти на корисну модель:**

21. Пат. 102040 Україна, МПК E21C41/00 Розчин для протифільтраційної завіси/ Мартиненко Т.В., Чушкіна І.В., Гришко Г.М., Кухарук П.В., **Рудаков Л.М.**, Бегун О.І., Дерев'янка В.М., П'ятниця І.В. заявл. 28.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19. *Особистий внесок полягає в обґрунтуванні фізико-хімічних та екологічних критеріїв підбору компонентів розчину.*

22. Пат. 120061 Україна МПК E02B3/16. Розчин для протифільтраційної завіси/ Ткачук Т.І., Любченко В.В., Гапич Г.В., Гришко Г.М., **Рудаков Л.М.**, Бегун О.І., Дерев'янка В.М.; заявл. 03.04.2017; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20. *Особистий внесок полягає в обґрунтуванні фізико-хімічних та екологічних критеріїв підбору компонентів розчину.*

23. Пат. 155030 Україна, МПК E21C41/32. Спосіб рекультивації відпрацьованих хвостосховищ уранопереробних виробництв /**Рудаков Л.М.**, Гапич Г.В., Калганков Є.В.; заявл. 10.07.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. №2. *Особистий внесок полягає у теоретичному обґрунтуванні екологічно безпечної покрової технології ізоляції та стабілізації радіоактивно забруднених поверхонь хвостосховищ.*

24. Пат. 156936 Україна МПК E21C41/32 E21F15/00. Спосіб рекультивації хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35. *Особистий внесок полягає у теоретичному обґрунтуванні екологічно безпечної покрової технології ізоляції та стабілізації радіоактивно забруднених поверхонь хвостосховищ.*

25. Пат. 156998 Україна МПК 21C41/00. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35. *Особистий внесок полягає у науковому обґрунтуванні екологічних критеріїв підбору фітомеліорантів та біологічно активних речовин для створення стійкого рослинного і дернового покриву.*

26. Пат. 156999 Україна МПК E21C41/32 E21F15/00. Спосіб рекультивації хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35. *Особистий внесок полягає у теоретичному обґрунтуванні екологічно безпечної технології ізоляції та стабілізації радіоактивно забруднених поверхонь хвостосховищ.*

27. Пат. 156782 Україна, МПК G01V3/00. Спосіб встановлення шляхів фільтраційної міграції радіонуклідів крізь порушені ділянки конструкції ґрунтових дамб обвалування хвостосховищ/**Рудаков Л.М.**, Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Гапич Г.В.; заявл. 29.05.2023; опубл. 07.08.2024, Бюл. № 32. *Особистий внесок полягає у розробці алгоритму комплексного застосування методів неруйнівного контролю, у виконанні експериментальних геофізичних вимірювань на ділянках дамб обвалування хвостосховища.*

28. Пат. 156756 Україна МПК A01B79/00 E21C41/26. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 31.07.2024, Бюл. № 31. *Особистий внесок полягає у науковому обґрунтуванні екологічних критеріїв підбору фітомеліорантів для створення стійкого рослинного і дернового покриву.*

29. Пат. 156757 Україна МПК E21C41/00. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 31.07.2024, Бюл. № 31. *Особистий внесок полягає у науковому обґрунтуванні екологічних критеріїв підбору фітомеліорантів та біологічно активних речовин для створення стійкого рослинного і дернового покриття.*

30. Пат. 121578 Україна МПК E02B3/00 E02B3/16. Протифільтраційна композиція/ Ткачук Т.І., Любченко В.В., Гапіч Г.В., Сопільняк С.В., Бегун О.І., **Рудаков Л.М.**, Онопрієнко Д.М., Гришко Г.М.; заявл. 16.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 27. *Особистий внесок полягає в обґрунтуванні фізико-хімічних та екологічних критеріїв підбору компонентів композиції.*

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

31. **Рудаков Л.М.**, Орлінська О.В., Гапіч Г.В. Оцінка стану гідротехнічних споруд меліоративних систем Дніпропетровської області//Матеріали науково-практичної конференції "Природа і вода" 22 березня 2018 р. – Дніпро: ДДАЕУ. – 2018. – С.49-50. *Автором сформовано методуку проведення досліджень.*

32. Гапіч Г.В., **Рудаков Л.М.**, Загній А.О. Оцінювання технічного стану та безпеки експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд водогосподарського призначення//Матеріали Регіональної науково-практичної конференції "Вода для всіх", присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів (м. Дніпро, 22 березня 2019 р.). – С.10-13. *Особисто виконано системний аналіз стану гідротехнічних споруд меліоративних систем.*

33. **Рудаков Л.М.** Небезпечні техногенні процеси в ґрунтових гідротехнічних спорудах//Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку меліорації земель» (до дня пам'яті доктора географічних наук, професора Литовченка О.Ф.). 30 листопада 2020 р. Дніпро: ДДАЕУ, 2020. С.64-67.

34. Орлінська О. В., Пікареня Д. С., **Рудаков Л.М.**, Гапіч Г.В. Дослідження шляхів фільтрації води з гідротехнічних споруд зрошувальних мереж//Ґрунтові води : Матеріали регіональної науково-практичної конференції (03 червня 2022 р.) : До Всесвітнього дня води. – Дніпро: ДДАЕУ, 2022. – С. 51 - 52. – Режим доступу: [URI \(Уніфікований ідентифікатор ресурсу\): https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9274](https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9274) *Особистий внесок полягає у виконанні експериментальних геофізичних вимірювань на ГТС.*

35. **Рудаков Л.М.** Проблема зникнення малих річок на прикладі межиріччя Коноплянки і Дніпра ЗБІРНИК ТЕЗ XI Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «ПРИСКОРЕННЯ ЗМІН ДЛЯ ПОДОЛАННЯ ВОДНОЇ КРИЗИ В УКРАЇНІ», Присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів. Київ, Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2023. С. 141-142.

36. Гапіч Г.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Шляхи рекультивації хвостосховища радіоактивних відходів у місті Кам'янське//Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» - 2023: матеріали міжнар. конф., 11-13 жовтня 2023 р., м. Дніпро. – Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – С. 57-59. *Автором теоретично обґрунтуванні шляхи рекультивації хвостосховищ у м. Кам'янське.*

37. **Рудаков Л.М.**, Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Роль водогосподарської інфраструктури у забезпеченні водної та екологічної безпеки в умовах

військового стану// Матеріали I Міжнародної конференції «Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку», 23 жовтня 2025 р. Київ. С.59-61. *Особисто науково обґрунтовано засади суміжного функціонування промислових та цивільних ГТС в умовах загрози руйнувань.*

38. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Оцінка тектонічного ризику порушення стійкості гідротехнічних споруд хвостосховища «Дніпровське» на основі аналізу лінеаментних зон та геофізичних даних//3 Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Impact of Artificial Intelligence and Other Technologies on Sustainable Development», 11-12 грудня 2025 р. Дніпро. С.225-229. *Особистий внесок полягає у розробці методологічного підходу до оцінювання тектонічного ризику для ГТС хвостосховищ.*

39. Рудаков Д.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Оцінка індексів небезпеки та ризику хвостосховищ Дніпропетровської області// Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Development of Education, Science and Business: Results 2025», 18-19 грудня 2025 р. Дніпро. С. 432-434. *Особисто зібрані та систематизовані вхідні параметри для розрахунку індексів.*

40. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Тектонічний фактор впливу на-дамбу хвостосховища радіоактивних відходів «Сухачівське» //Science, Technology and Industry in the Digital Age: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 2nd International Scientific and Technikal Conference. International Scientific Unity. December 17-19, 2025. Hamburg, Germany. P. 339-343. *Особистий внесок полягає у проведенні системного аналізу впливу тектоніки на екологічну безпеку та цілісність дамби хвостосховища.*

#### АНОТАЦІЯ

Рудаков Л.М. Науково-технічні засади управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового комплексу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота присвячена актуальній науково-технічній проблемі управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд (ГТС) гірничопромислового комплексу. У роботі вперше розроблено цілісну наукову концепцію, що об'єднує промислові хвостосховища та цивільні системи в єдину гідродинамічну мережу регіону. Це дозволяє розглядати цивільні ГТС як стратегічні інженерні бар'єри для локалізації техногенних забруднень у разі аварій або воєнних дій, а також як питне та технічне водопостачання гірничорудних регіонів.

Доведено, що на стан огороджувальних дамб, окрім гідрологічних та кліматичних чинників, фундаментальний вплив справляє сучасна геодинамічна активність. Науково обґрунтовано комплексну методику діагностики, що поєднує методи природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) та вертикального електричного зондування (ВЕЗ). Встановлено, що аномалії електромагнітного поля просторово збігаються з системами тектонічних тріщин, які слугують основними каналами витоку небезпечних речовин.

На прикладі хвостосховищ «Дніпровське», «Сухачівське» та Вільногірського ГМК виявлено пряму кореляцію між ступенем обводнення дамб та тектонічною порушеністю їхньої основи. За допомогою математичного моделювання у програмі Phase2 встановлено, що поєднання обводнення та динамічних навантажень від транспорту знижує коефіцієнт стійкості споруд нижче нормативних значень. Прогнозні моделі міграції радіонуклідів підтвердили, що тектонічна тріщинуватість дозволяє фронту урану ( $^{238}\text{U}$ ) досягати водних об'єктів у короткі терміни.

У роботі проведено ранжування об'єктів за міжнародними індексами небезпеки (THI) та ризику (TRI), що дозволило визначити пріоритетність заходів з рекультивації. Розроблено та класифіковано типові технологічні рішення для підвищення безпеки ГТС, включаючи створення багат шарових екранів із геосинтетичних матеріалів та впровадження ін'єкційних протифільтраційних завіс. Доведено, що створення таких завіс у зонах тектонічних аномалій є економічно ефективнішим за традиційне привантаження укосів.

Запропоновано перехід до маловодних технологій складування відходів (пастоподібне та сухе складування), що мінімізує фільтрацію та дозволяє повернути до 85% технічної води у виробничий цикл. Сформульовані в дисертації науково-технічні засади забезпечують перехід від пасивного спостереження до проактивного управління екологічною безпекою, що є критично важливим для сталого розвитку промислових регіонів України в умовах сучасних викликів.

*Ключові слова:* екологічна безпека, гідротехнічні споруди, хвостосховище, система зрошення, геофізичний моніторинг, геотектоніка, фільтрація, міграція, радіонукліди, індекс небезпеки.

## ABSTRACT

*Rudakov L.M.* Scientific and technical principles of environmental safety management for hydraulic structures in the mining industry. – Unpublished manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.01 – Environmental Safety. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

This dissertation is a comprehensive research study that addresses the pressing scientific issue of establishing a methodology for ensuring the environmental safety of hydraulic structures through the integration of instrumental diagnostic methods and predictive modeling. Based on an analysis of global trends in the mining industry, it has been established that disturbances in the hydrodynamic equilibrium of tailings ponds pose irreversible threats to the geological and aquatic environments of industrial regions. The work establishes that the progressive degradation of protective dams within the mining and industrial complex of the Dnipropetrovsk region is caused by the cumulative impact of anthropogenic waterlogging and dynamic loads from transportation routes. It is argued that existing routine monitoring systems require supplementation with methods for remote identification of hidden areas of internal erosion. A conceptual model for managing environmental risks has been developed, based on the identification of zones of geodynamic instability and the assessment of their impact on the migration of pollutants. As a result of the research, it has been

proven that the intensification of filtration flows is a key indicator of the transition of the “structure-environment” system to a critical state.

Mathematical models of the stress-strain state of soil masses have been developed, which account for the anisotropy of the physical and mechanical properties of alluvial deposits. Patterns of transformation of natural electromagnetic field parameters under the influence of active suffusion and compaction of dam bodies have been established. New data on the correlation between the seismoacoustic emission of massifs and the probability of emergency situations at hazardous waste storage facilities have been obtained.

Based on the analysis of a large array of statistical data on accident rates, the main man-made causes of gas transmission system (GTS) failures in global practice have been identified. The methodology for the comprehensive use of non-destructive remote methods of environmental monitoring has been examined in detail. It has been established that the method of the Earth’s natural pulsed electromagnetic field (EPEMF) is the most effective tool for rapid scanning of the condition of dams. Optimal parameters of the measurement network for conducting long-term research at large-scale facilities have been substantiated. A methodology for interpreting geophysical signals to rapidly identify hidden zones of soil compaction has been developed. As a result of the research, a correlation between the specific electrical resistivity of soils and their current moisture content has been experimentally determined. Mathematical models have been developed that allow for the highly accurate estimation of the dynamics of the filtration flow front’s progression over time.

Threshold values for the radiation intensity of the PIEMPS have been established, which indicate a critical risk of a breach in the containment dam. Experimental confirmation has been obtained of the high sensitivity of modern magnetometric methods to the detection of corrosion wear of metal structural elements. Based on an analysis of the complex geological structure of the areas where the storage facilities are located, significant risks of seismic impact on their integrity have been identified.

The complex environmental situation in the area of the inactive “Dniprovske” tailings pond in Kamyanske has been examined in detail. It has been established that the radioactive legacy of former uranium production requires the implementation of special engineering safety measures. The necessity of urgently reinforcing the phosphogypsum protective layer to reliably prevent wind-blown dust formation and the infiltration of atmospheric water into the tailings pond bed is substantiated. A refined scheme of radionuclide migration in underground horizons toward the Konoplyanka River channel has been developed, allowing the identification of local areas of intense leachate discharge in the sub-footing section of the protective dams. Mathematical models of uranium isotope adsorption by various types of foundation soils and the tailings pond body were developed. It was established that the existing hydraulic connection between the storage facility and the Dnipro River poses a long-term threat on a regional scale. Detailed maps of the spatial distribution of background radiation in the residential area adjacent to the facility were obtained.

Based on an analysis of the current condition of the Sukhachivske tailings pond, areas prone to dangerous surface and internal suffusion have been identified. Predictive modeling in the Phase 2 program showed that for the Sukhachivske 1C dam, when

water saturation and the vibrational impact of motor vehicles are combined, the stability coefficient decreases to  $k_s = 1.202$ , which is lower than the regulatory requirements ( $[k_s] = 1.25$ ) and poses a risk of failure.

At VGMK in the Skazhena ravine, a rise in the levels (on average by 0.7–1.0 m/year) of two anthropogenic aquifers has been observed; their convergence causes waterlogging and soil creep. This process, combined with lateral pressure from slurry masses, intensifies landslide formation, posing a threat to the integrity of retaining structures. Seismic activity in the region has been identified as an additional environmental risk, which, under conditions of significant waterlogging, could lead to dam failure.

Aspects of environmental safety of hydraulic engineering systems for civil and land reclamation purposes are also considered. A connection has been established between the poor technical condition of irrigation canals and the processes of secondary salinization of agricultural lands in the Dnipropetrovsk region. A methodology for using the Earth's natural pulsed electromagnetic field to detect hidden voids and leaks in the concrete lining of hydraulic structures has been substantiated.

This paper examines technical solutions for stabilizing the environmental condition of gas transmission systems. The high effectiveness of the combined use of geosynthetic materials for reinforcing external slopes has been established. The feasibility of using jet grouting technology for the rapid creation of anti-filtration curtains has been substantiated. Scientific proposals have been developed for a phased transition to environmentally safe paste thickening of enrichment waste. As a result of the research, optimal ratios of grouting mixtures for strengthening weak foundations of structures have been determined. A functional structure of a digital early warning system for the threat of environmental emergencies has been developed.

It has been established that the implementation of comprehensive automated monitoring reduces the overall risk of disasters by 30%. Positive results were obtained from the industrial testing of the proposed solutions at the facilities of the State Enterprise "Barrier." Based on an analysis of the overall environmental impact, the feasibility of widespread industry-wide implementation of the research results has been established.

Thorough examination of the study's general findings establishes that the developed scientific and technical principles provide a methodological foundation for managing the environmental safety of gas transmission systems under conditions of increasing anthropogenic pressure, which is of great importance for the sustainable development of industrial regions. The scientific novelty of the obtained results is substantiated, which lies in the development of a comprehensive approach to assessing the condition of structures through the lens of their interaction with ecosystems. As a result of the conducted research, a strategy for the environmental modernization of gas transmission systems has been formulated, aimed at minimizing risks to public health. Mathematical and instrumental tools have been developed that enable a transition from reactive to proactive management of environmental safety. The full compliance of the proposed solutions with the principles of Ukraine's environmental legislation and European Union directives has been established. A significant contribution has been made to the theory of forecasting man-made emergencies under conditions of a changing climate and geological environment. The technical implementation of the

dissertation's results ensures reliable protection of the natural environment and contributes to strengthening the national security of the state.

*Keywords:* environmental safety, hydraulic structures, tailings pond, irrigation system, geophysical monitoring, geotectonics, filtration, migration, radionuclides, hazard index.

**РУДАКОВ Леонід Миколайович**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ  
БЕЗПЕКОЮ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД  
ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

(Реферат)

Підписано до друку 100.00.2026. Формат 60×90/16.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,99.  
Обл.-вид. арк. 1,99. Тираж 100 прим. Зам. №47

Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19